

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**IGOR OLIVEIRA DA MATA
LUCAS FERNANDES ALVES
MIGUEL PIMENTEL DE OLIVIERA**

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS

VOLTA REDONDA, RJ

2020

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do UniFOA como requisito a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Alunos:

Igor Oliveira da Mata

Lucas Fernandes Alves

Miguel Pimentel de Oliveira

Orientador: Prof. Me. Jesus C. de A. Alvarenga

Coorientador: Prof. Marcelo Estevão dos Santos

VOLTA REDONDA, RJ

2020

RESUMO

Este estudo refere-se à comparação entre dois tipos de pavimentos - rígidos e flexíveis, suas estruturas, materiais utilizados, metodologia de implantação, aspectos físicos, comparação dos métodos de construção, manutenção, os tipos de patologias e o tempo de vida útil a fim de analisar o mais vantajoso do ponto de vista técnico e econômico. O método empregado foi o levantamento de dados existentes e coleta de novos dados para comparação entre eles, realizando um levantamento bibliográfico apresentando as vantagens, do ponto de vista da engenharia, com maior qualidade ao menor custo.

Palavras-chave: Pavimento Rígido, Pavimento Flexível, Estrutura do pavimento, Comparação dos Pavimentos.

ABSTRACT

This study refers to the comparison between two types of pavements - rigid and flexible, their structures, materials used, implantation methodology, physical aspects, comparison of construction methods, maintenance, types of pathologies and the useful life in order to analyze the most advantageous from a technical and economic point of view. The method used was the survey of existing data and the collection of new data for comparison between them, a bibliographic survey was carried out showing the advantages, from the engineering point of view, with higher quality at the lowest cost.

Keywords: Rigidpavement. Flexiblepavement. Pavementstructure. Comparison of pavements.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
	1.1 – Objetivos	14
	1.2 – Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
	2.1 – Definição de Pavimento	15
	2.2 - Distribuição das Pressões	17
	2.3 – Carga de Roda Equivalente	18
	2.4 – Classificação dos Pavimentos	21
	2.5 – Camadas	22
	2.6 – Subleito	22
	2.7 – Regularização	25
	2.8 – Reforço do Subleito	25
	2.9 – Sub-base	26
	2.10 – Base	26
	2.11 – Revestimento	27
	2.12 – Bases Rígidas	30
	2.13 – Bases Flexíveis	30
	2.14 – Revestimentos	32
3	CARACTERÍSTICAS DE DIMENSIONAMENTO DE PAV. RÍGIDOS	36
	3.1 – Propriedades de suportar cargas do Subleito	36
	3.2 – Sub-base	36
	3.3 – Condições Climáticas	37
	3.4 – Propriedades Mecânicas do Concreto	39
	3.5 – Cargas e eixos equivalentes	40
	3.6 – Transferência de Carga	40

4	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	41
4.1	– Determinação do ISC	41
4.2	- Determinação do Número N	41
4.3	- Coeficiente de Equivalência	43
4.4	– Características do Pavimento Flexível	46
4.5	– Resistência a derrapagem e drenagem	46
4.6	– Capacidade Estrutural dos Pavimentos Flexíveis	47
4.7	– Reciclagem	48
4.8	– Manutenção	48
5	COMPARAÇÃO ENTRE PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS	49
5.1	– Pavimentos Rígidos	49
5.2	– Pavimentos Flexíveis	49
6	METODOLOGIA	54
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	BIBLIOGRAFIA	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concreto Cimento Portland	12
Figura 2 – Concreto Asfáltico	13
Figura 3 – Sistemas de Camadas de um pavimento e tensões	14
Figura 4 – Sistema de camadas do pavimento	15
Figura 5 – Área de contato pneu x pavimento	16
Figura 6 – Distribuição dos esforços	18
Figura 7 – Efeitos superpostos	19
Figura 8 – Carga no pavimento e fundação	20
Figura 9 – Seção transversal típica – pavimento flexível	24
Figura 10 - Seção transversal típica – pavimento rígido	24
Figura 11 – Resistência a flexão	39
Figura 12 – Momento fletor em uma camada	39
Figura 13 – Espessuras das camadas e nomenclaturas	45
Figura 14 - Diferença de tempo para reabilitação	50
Figura 15 - Temperatura em pavimentos.	50
Figura 16 - Efeito de deflexão em pavimentos	51
Figura 17 – Camadas de suporte	51
Figura 18 - Iluminação pública em pavimentos	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre pavimentos rígidos e flexíveis

56

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Largura das camadas do pavimento	29
Tabela 2 – Largura das faixas de rolamento	29
Tabela 3 – Coeficiente de equivalência k	43
Tabela 4 - Relação do número N e as espessuras do revestimento	44

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Fator de equivalência de operações, FEO - Eixo Simples	42
Gráfico 2 - Fator de equivalência de operações, FEO – Eixo Tandem Duplo	42
Gráfico 3 - Fator de equivalência de operações, FEO – Eixo Tandem Triplo	43
Gráfico 4 - Gráfico de dimensionamento flexível	44

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO Transportation Officials	American Association of State Highway and
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CA	Concreto Asfáltico
CBR	California Bearing Ratio- Índie
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DAER Rodagem	Departamento Autônomo de Estradas de
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT Transportes	Departamento Nacional de Infraestrutura de
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PMF	Pré-Misturado a Frio
PMQ	Pré-Misturado a Quente

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto: em um extremo, têm-se as estruturas rígidas e, no outro, as flexíveis (BERNUCCI, 2007).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento (BERNUCCI, 2007).

Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço, conforme Figura 1. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI, 2007).

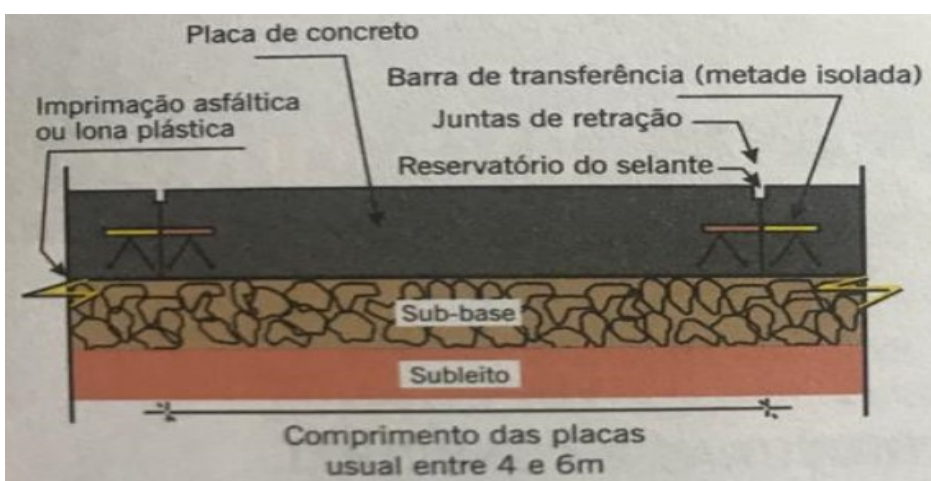


Figura 1: Concreto-cimento (corte longitudinal)
Fonte: (BERNUCCI, 2007).

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camadas de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou ligação, por vezes denominadas de binder, embora essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros, conforme Figura 2 (BERNUCCI, 2007).

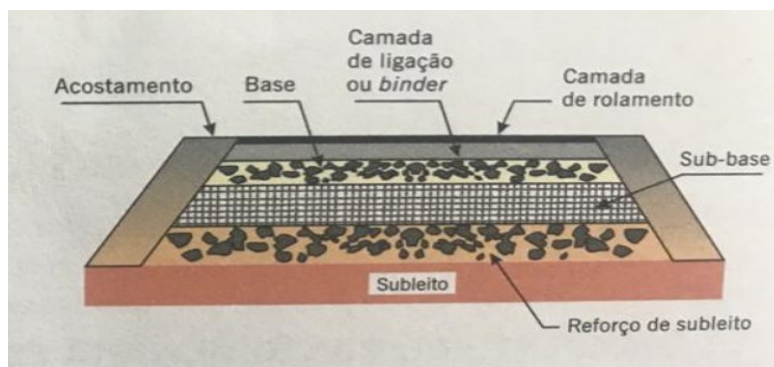


Figura 2: Asfalto (corte transversal)
Fonte: (BERNUCCI, 2007).

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). Os diversos materiais que podem constituir esse revestimento são objetivo dessa monografia. As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas a trinca por fadiga dessa camada. Ela ainda pode apresentar trinca por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática etc. parte de problemas relacionados à deformação

permanente e outros defeitos pode ser atribuída aos revestimentos asfálticos. Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, Figura 3, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos (MEDINI, 1997).

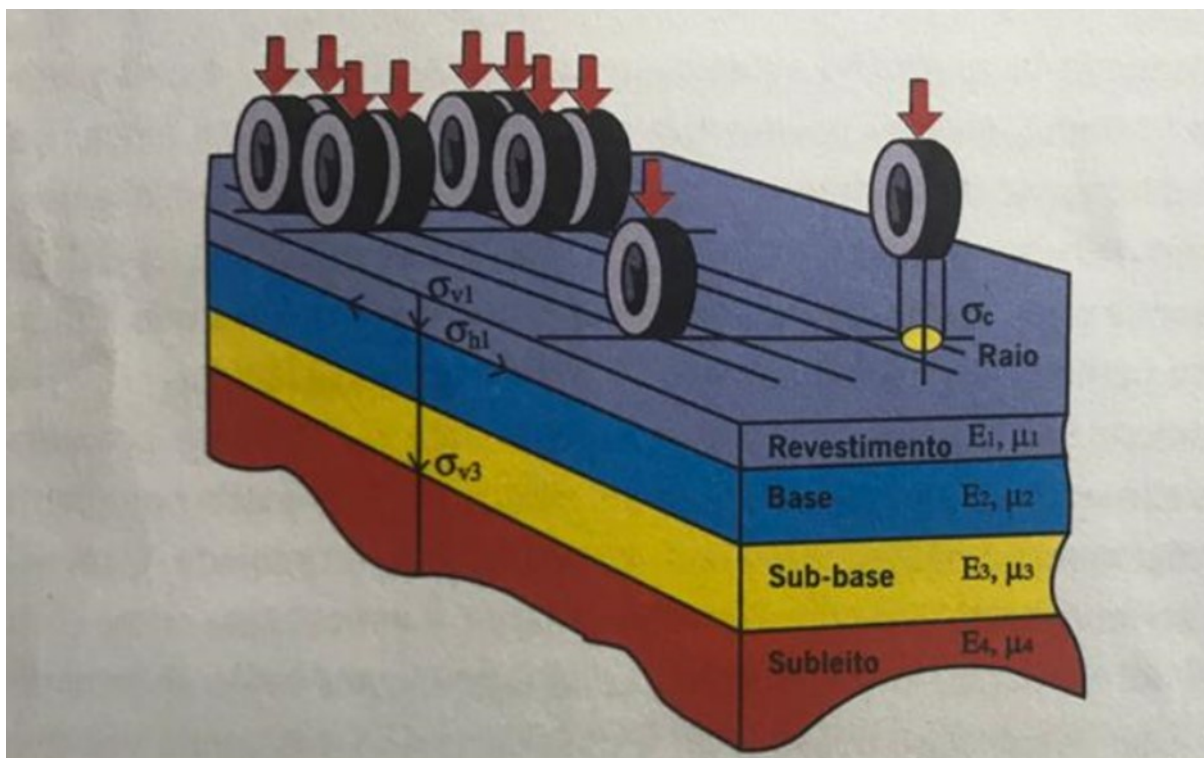


Figura 3: Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões
Fonte: (BERNUCCI, 2007).

1.1 OBJETIVOS

Efetuar uma análise comparativa econômica e estrutural entre as alternativas de pavimentos rígidos e flexíveis durante as etapas de construção, operação e manutenção no projeto de pavimentos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Conhecer as características dos pavimentos rígidos e flexíveis.

Comparar as características entre os pavimentos rígidos e flexíveis.

Realizar uma pesquisa bibliográfica das principais diferenças.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de pavimento

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada a técnica e economicamente, a:

- a - Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- b - melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- c - resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

É um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.

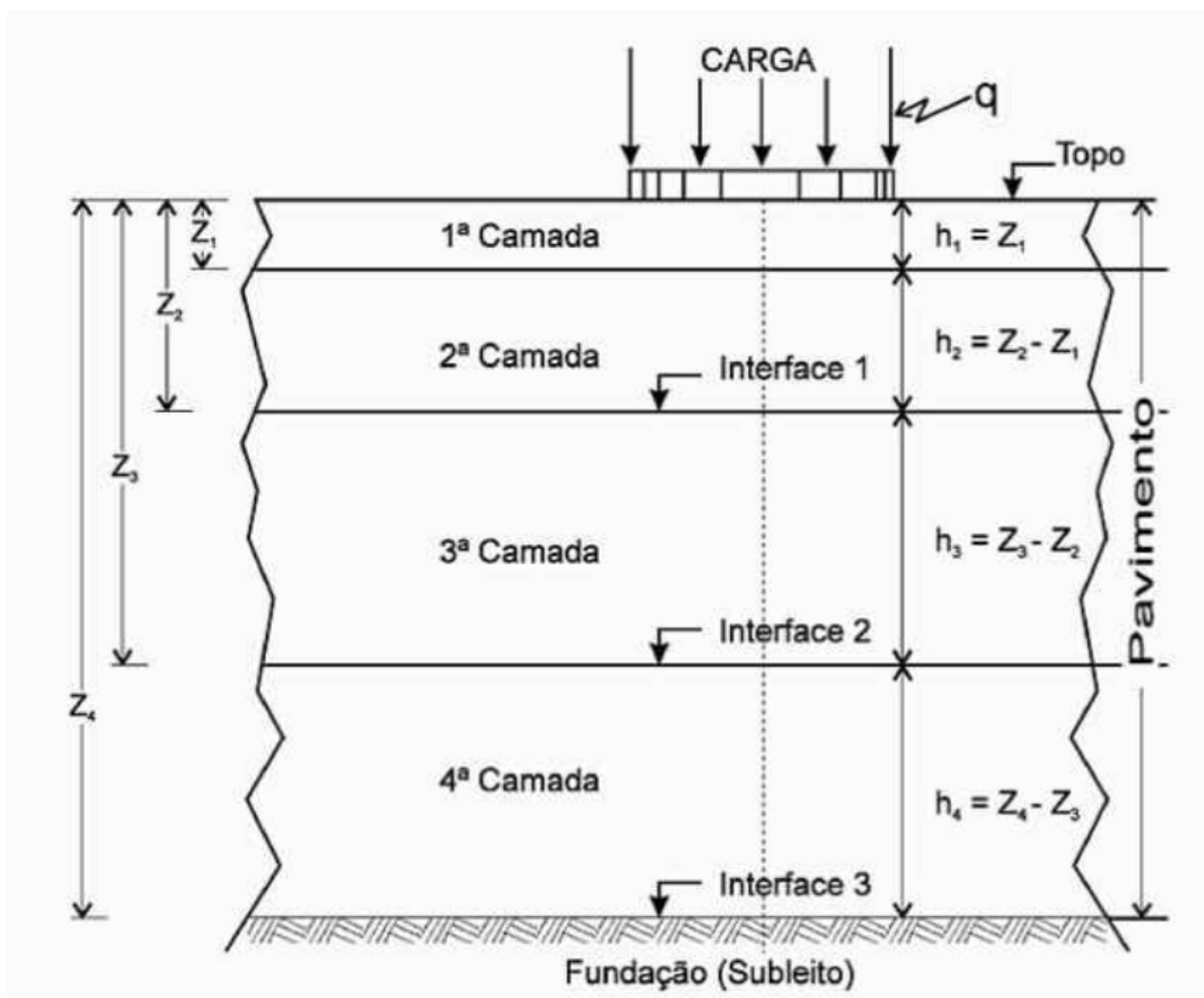


Figura 4: Sistema de várias camadas do pavimento
Fonte: (SENÇO, 2007).

As cargas que solicitam um pavimento são transmitidas por meio das rodas pneumáticas dos veículos. A área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma aproximadamente elítica – Figura 5, e a pressão exercida, dada a relativa rigidez dos pneus, tem uma distribuição aproximadamente parabólica, com a pressão máxima exercida no centro da área carregada (SENÇO, 2007).

As cargas que solicitam um pavimento são transmitidas por meio das rodas pneumáticas dos veículos. A área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma aproximadamente elítica, e a pressão exercida, dada a relativa rigidez dos pneus, tem uma distribuição aproximadamente parabólica, com a pressão máxima exercida no centro

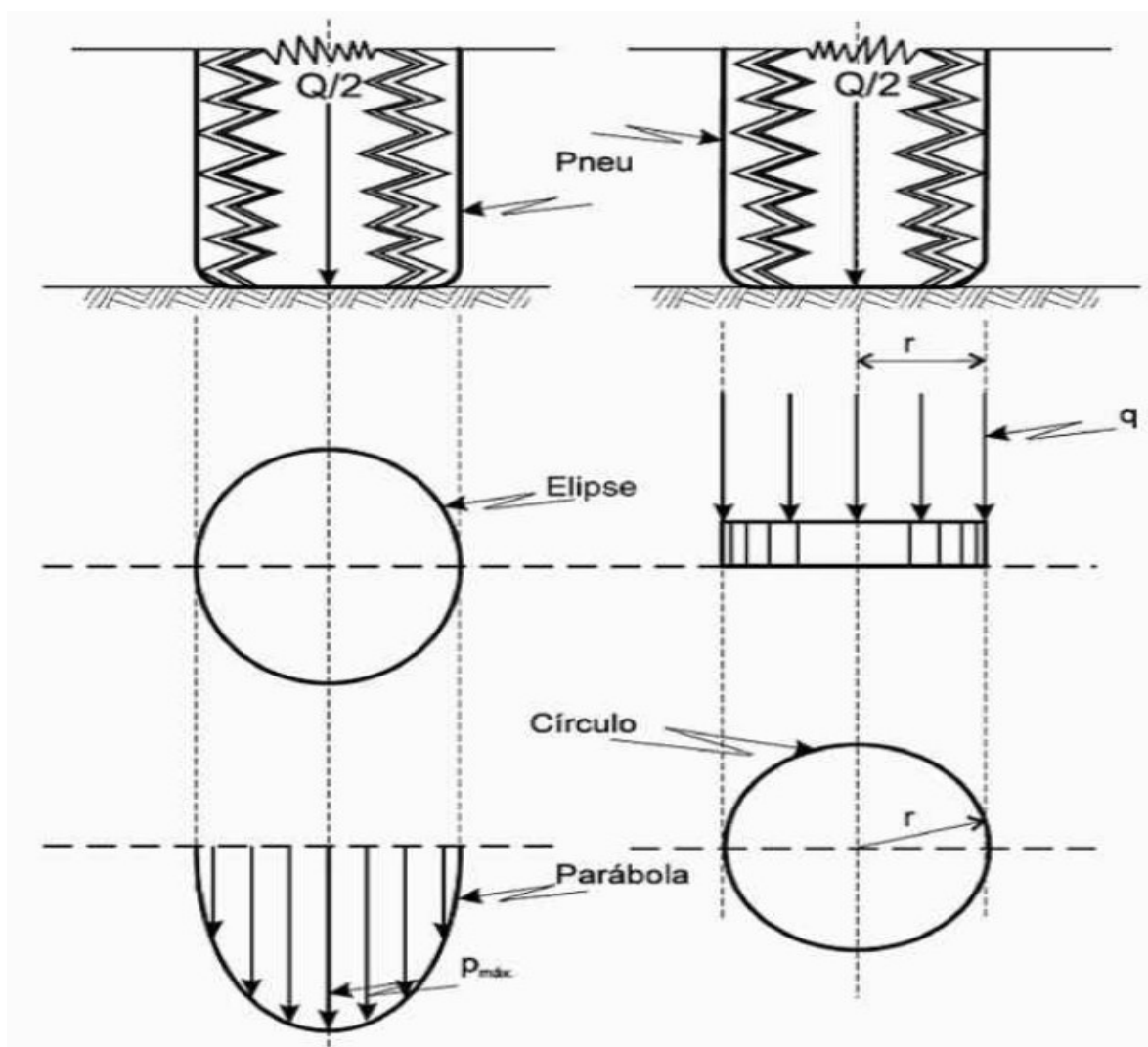


Figura 5: Área de contato pneu x pavimento
Fonte: (SENÇO, 2007).

A camada construída para resistir e distribuir os esforços resultantes das cargas do tráfego, que são predominantemente de direção vertical, recebe o nome de base do pavimento. A camada superficial e que tem contato direto com os pneumáticos, construída então para resistir a esforços horizontais, recebe o nome de revestimento ou capa de rolamento, ou simplesmente capa. Esses esforços horizontais provocam o desgaste da superfície, razão por que, periodicamente, o revestimento deve ser superposto por nova camada — recapeamento —, reforçado ou mesmo substituído (SENÇO, 2007).

2.2 Distribuição das pressões

Para melhor compreender as definições das camadas que compõem um pavimento, é preciso considerar que a distribuição dos esforços através do mesmo deve ser tal que as pressões que agem na interface entre o pavimento e a fundação, ou subleito, sejam compatíveis com a capacidade de suporte desse subleito.

As Figuras 6 e 7 mostram uma distribuição de pressões segundo um ângulo α , de tal maneira que a pressão de contacto q pode ser considerada a pressão aplicada a uma profundidade $z = 0$. A partir daí, as pressões estão referidas às profundidades crescentes, chegando à interface entre o pavimento e o subleito, na profundidade z , com uma pressão σ_z (SENÇO, 2007).

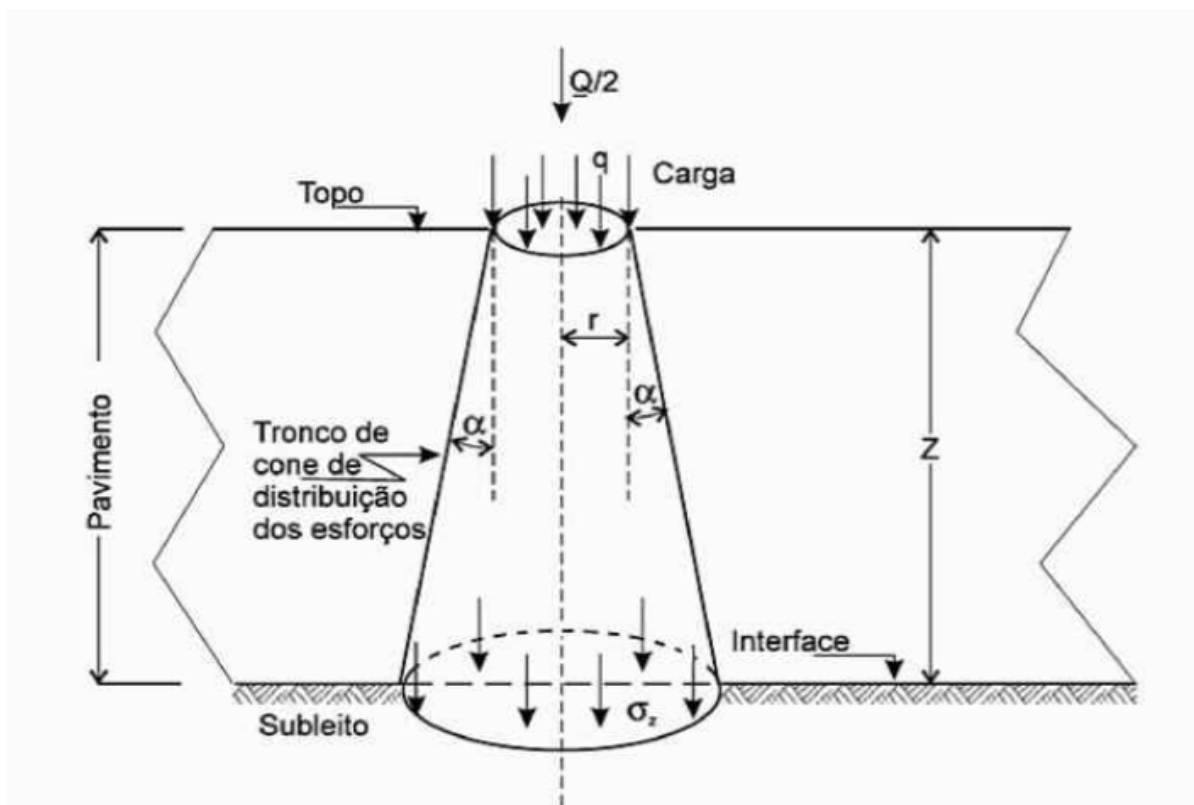


Figura 6: Distribuição dos esforços
Fonte: (SENÇO, 2007).

2.3 Carga de roda equivalente

É a carga sobre uma roda simples, com a mesma área de contatos que uma das rodas de um conjunto, que produz o mesmo efeito desse conjunto a uma determinada profundidade. A legislação brasileira estabelece os seguintes tipos e limites de carga por eixo:

- Eixo simples com rodas simples — ESRS — máximo de 5 tf;
- Eixo simples com rodas duplas: — ESRD — máximo de 10 tf;
- Eixo em tandem duplo — ETD — máximo de 17 tf;
- Eixo em tandem triplo - ETT - máximo de 25,5 tf.

No estudo das cargas de roda é essencial o estabelecimento da equivalência, quer entre modelos de contatos diferentes (eixo simples de rodas simples com eixo simples de roda dupla), como a equivalência entre cargas diferentes transmitidas com sistemas semelhantes. A deformação e mesmo a destruição dos pavimentos dependem dos fatores enumerados. Interessa saber

como as cargas vão ser transmitidas ao pavimento e nem tanto a carga total do veículo, Como mostra a Figura 6, cargas de roda ou de eixos próximos têm seus efeitos sobre os pavimentos superpostos; para que sejam consideradas isoladas, é necessária uma distância entre os eixos que evite essa superposição de efeitos (SENÇO, 2007).

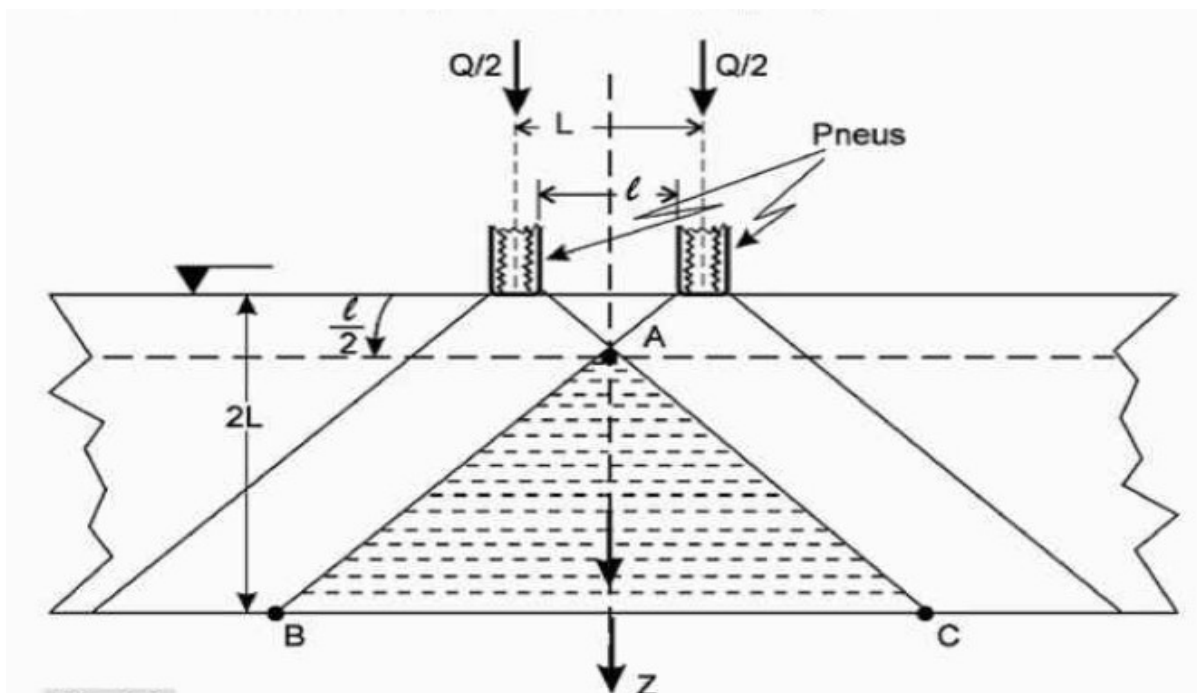


Figura 7: Efeitos superpostos

Fonte: (SENÇO, 2007).

A Figura 7 mostra um caso de rodas duplas, de eixo simples, em que temos:

l - Distância entre as faces internas das rodas;

L =Distância entre os centros das rodas;

Q =Carga por eixo simples;

Q/2 =Carga de roda.

O triângulo ABC corresponde à área de superposição de efeitos.

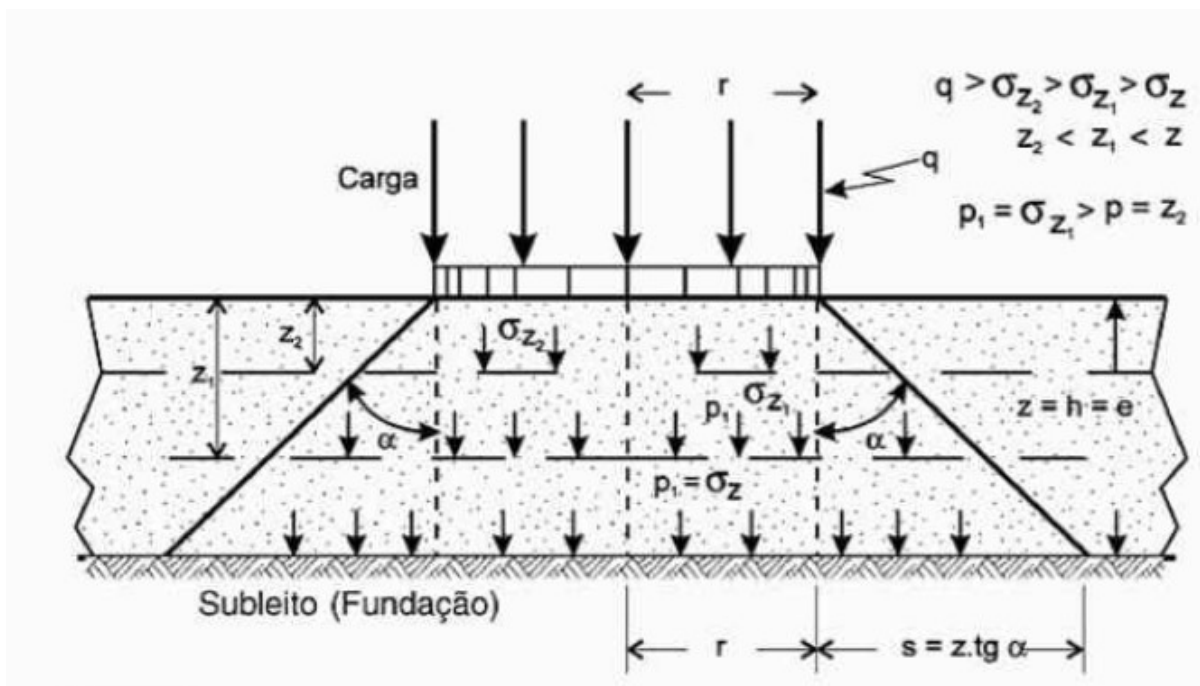


Figura 8: Carga pavimento e fundação.
Fonte: (SENÇO, 2007).

Como a pressão aplicada é reduzida com a profundidade, as camadas superiores estão submetidas a maiores pressões, exigindo na sua construção materiais de melhor qualidade. Para a mesma carga aplicada, a espessura do pavimento deverá ser tanto maior quanto pior forem as condições do material de subleito. Sem rigorismo extremo, pode-se mencionar a regra de que subleito ruim e cargas pesadas levam a pavimentos espessos; subleito de boa qualidade, e cargas leves levam a pavimentos delgados (SENÇO, 2007).

De qualquer maneira, sendo as pressões decrescentes com a profundidade, o engenheiro é conduzido a complementar a base com uma camada estruturalmente suficiente com materiais menos nobres do que o material da base. A essa camada complementar dá-se o nome de sub-base. Praticando o mesmo raciocínio para essa sub-base, ela pode ser complementada por uma camada de material menos nobre, que recebe o nome de reforço do subleito (SENÇO, 2007).

2.4 Classificação dos pavimentos

Em linhas gerais, pode-se adotar a Terminologia Brasileira — TB-7 da Associação Brasileira de Normas Técnicas—ABNT. Sendo o pavimento uma estrutura constituída de diversas camadas, encontramos sérias dificuldades para achar um termo que possa definir toda a estrutura.

De uma forma geral, os pavimentos poderiam ser classificados em:

- a) Pavimentos rígidos;
- b) Pavimentos flexíveis;
 - Pavimentos rígidos: são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações.
 - Pavimentos flexíveis: são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.

A dificuldade maior de adotar essa classificação é a liberdade de utilizar camadas flexíveis e rígidas numa mesma estrutura de pavimento. Assim, nada impede a execução de uma camada de revestimento de concreto asfáltico, que é flexível, sobre uma camada de base de solo-cimento, que é rígida.

Estruturalmente, os pavimentos flexíveis são compostos das seguintes camadas:

- a) Camada de ligação (Binder): possui a mesma função de distribuição de carga, além de proporcionar uma superfície uniforme e plana para receber a camada de rolamento (DNIT,2004).
- b) Base: É a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los situada acima da sub-base. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento,

sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito (SENÇO, 2007).

- c) Sub-base: É a camada complementar à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Segundo a regra geral – com exceção dos pavimentos de estrutura invertida – o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base (SENÇO, 2007).
- d) Subleito: É a camada de terreno irregular ou natural que receberá às cargas provenientes do pavimento, com necessidade de regularização e compactação ou escavação para conformidades da estrada buscando ser evitado cortes difíceis no material (SENÇO, 2007).

2.5 Camadas

Uma seção transversal típica de um pavimento – com todas as camadas possíveis - consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento (Figuras 8, 9 e 10) (SENÇO, 2007).

2.6 Subleito

É o terreno de fundação do pavimento.

Se a terraplenagem é recente, o subleito deverá apresentar as características geométricas definitivas. No caso de uma estrada de terra já em uso há algum tempo e que se pretende pavimentar, o subleito apresenta superfície irregular devido ao próprio uso e aos serviços de conservação (SENÇO, 2007).

Em qualquer caso do semiespaço infinito, apenas a camada próxima da superfície é considerada subleito, pois, à medida que se aprofunda no maciço, as pressões exercidas são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis. Os

bulbos de pressão são construídos com curvas que representam percentuais da pressão de contato e decrescentes com o aumento da profundidade.

Geralmente as sondagens para amostragem de materiais destinados ao subleito de um pavimento são aprofundadas até três metros abaixo da superfície, considerando-se como fundação efetiva a camada comum a um e meio metros, aproximadamente (SENÇO, 2007).

Nos métodos de dimensionamento de pavimentos, a resistência do subleito é tomada de modo variável de método para método. Assim, por exemplo, no método CBR, a resistência do subleito é dada em porcentagem e é obtida num ensaio de laboratório em que se mede a resistência à penetração de um pistão numa amostra do solo do subleito, relacionando essa resistência à penetração, com a resistência oferecida por um material considerado padrão, ao qual se atribui um CBR = 100%.

No método de Francis Hveem, essa resistência é determinada num ensaio triaxial, realizado num aparelho próprio denominado Estabilômetro de Hveem. No método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER essa resistência é a média aritmética entre o CBR e outro índice — derivado do índice de Grupo —, que é função dos resultados dos ensaios de caracterização do solo do subleito, e *assim* por diante (SENÇO, 2007).

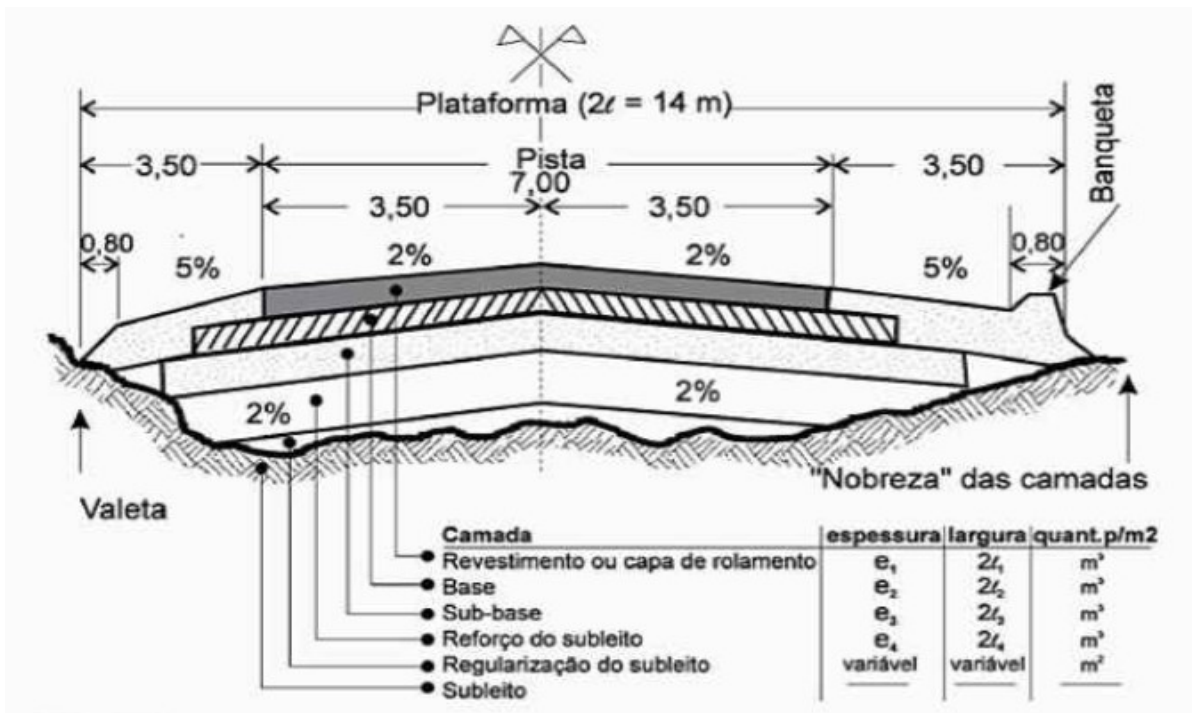


Figura 9: Seção transversal típica - pavimento flexível

Fonte: (SENÇO, 2007).

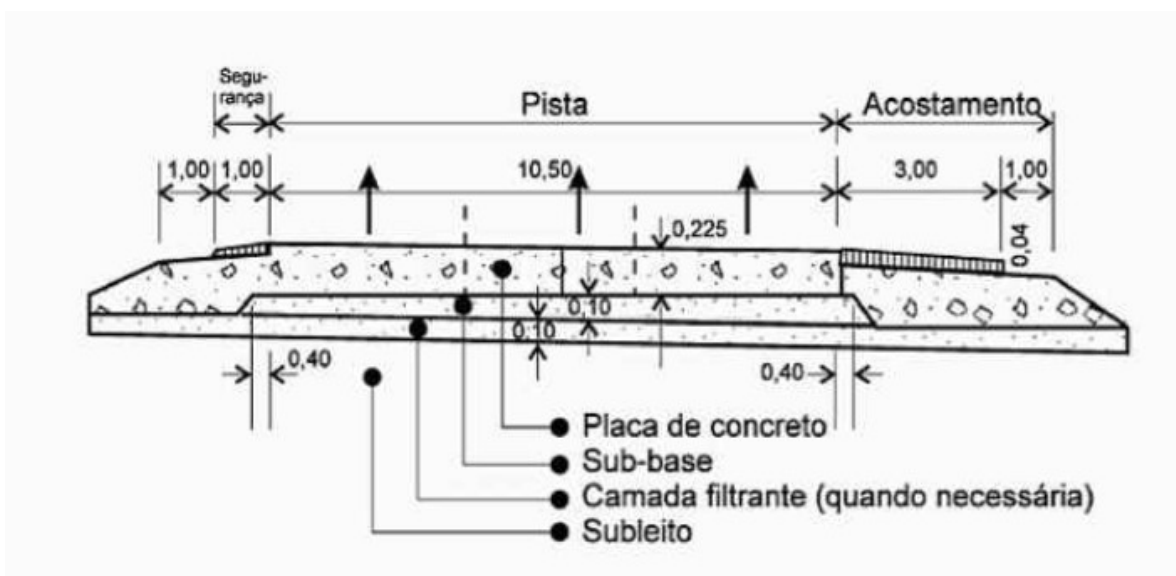


Figura 10: Seção transversal típica - pavimento rígido

Fonte: (SENÇO, 2007).

2.7 Regularização

É a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto, Deve ser executada, sempre que possível, em aterro, evitando:

- a) que sejam executados cortes difíceis no material da "casca" já compactada pelo tráfego, a maioria das vezes já por muitos anos;
- b) que seja substituída uma camada já compactada naturalmente por uma camada a ser compactada, nem sempre atingindo o grau de compactação existe;
- c) que não se sacrifique o equipamento de escarificação desnecessariamente, atingindo o grau de compactação existente;

Tendo em vista as dificuldades de medição dos volumes movimentados e por tratar-se geralmente de volumes relativamente pequenos, os serviços de regularização são pagos por metro quadrado. A operação de regularização é também chamada de preparo do subleito.

A regularização deve dar à superfície as características geométricas— inclinação transversal — do pavimento acabado. Nos trechos em tangente, duas rampas opostas de 2% de inclinação — 3 a 4%, em regiões de alta precipitação pluviométrica — e, nas curvas, uma rampa com inclinação da superelevação (SENÇO, 2007).

2.8 Reforço do subleito

É a camada constante, construída, se necessário, acima da regularização, com características tecnológicas superiores às da regularização e inferiores às da camada imediatamente superior, ou seja, a sub-base. Devido ao nome de reforço do subleito, essa camada é, às vezes, associada à fundação. No entanto, essa associação é meramente formal, pois o reforço do subleito é parte constituinte especificamente o pavimento e tem funções de complemento da sub-base que, por sua vez, tem funções de complemento da base. Assim, o reforço do subleito também resiste e distribui esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços, o que é característica específica do subleito (SENÇO, 2007).

Além do mais, se o reforço do subleito deve ser considerado camada do pavimento ou da fundação é um problema que não afeta a espessura total do pavimento, pois as diversas camadas devem ter capacidade de suporte para receber os esforços transmitidos através das camadas superiores (SENÇO, 2007).

Em conclusão, o reforço do subleito poderia ser considerado indistintamente camada suplementar do subleito ou camada complementar da sub-base (SENÇO, 2007).

2.9 Sub-base

É a camada complementar à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Segundo a regra geral —com exceção dos pavimentos de estrutura invertida — o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base.

2.10 Base

É a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

2.11 Revestimento

Também chamado de capa de rolamento ou, simplesmente, capa. É a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade da estrutura. No dimensionamento dos pavimentos, serão fixadas as camadas que devem ser construídas, sendo lógico que subleitos de boa qualidade

exigem pavimentos menos espessos e, em consequência, poderão dispensar a construção de camadas como reforço ou sub-base (SENÇO, 2007).

Em todos os métodos de dimensionamento, a camada de revestimento tem espessura adotada, seja em função de critérios próprios, seja em função do tráfego previsto. Para vias simples — duas faixas de tráfego e duas mãos de direção — espessuras de 3 a 5 cm são habituais. Para autoestradas, chega-se a revestimentos mais espessos, entre 7,5 e 10,0 cm (SENÇO, 2007).

Sendo o revestimento a camada mais nobre do pavimento, é evidente que a adoção da espessura não pode servir como medida que venha a reduzir sua resistência, pois representa uma parte do pavimento que é constituída de material mais apto a garantir eficiência no seu comportamento (SENÇO, 2007).

Dessa maneira, nenhum problema técnico deve ser proveniente do fato de fixar-se a espessura do revestimento para, em seguida, calcular as espessuras das demais camadas. O problema a ser examinado e resolvido é, sim, econômico, pois, sendo o revestimento a camada de maior custo unitário, com grande margem de diferença em relação às demais camadas, é necessário todo o cuidado na fixação de sua espessura e, conseqüentemente, do volume de cada quilômetro de pista (SENÇO, 2007).

Assim, os métodos de dimensionamento de pavimentos que resultam facilmente em espessos revestimentos não têm grande correspondência com a realidade econômica brasileira. A liberdade de escolha da espessura às vezes pode estar cerceada em limites muito estreitos elevar a revestimentos com espessuras que podem resultar na inviabilidade econômica do pavimento (SENÇO, 2007).

Em muitos casos, é preferível, quando da execução original do pavimento, sacrificar em parte a espessura do revestimento, em benefício de uma estrutura mais resistente e estável das camadas inferiores, a medida que o tráfego for exigindo, poder-se-á, por superposição, executar nova capa de rolamento, aproveitando toda a estrutura existente e tornando-a mais resistente. É um processo de pavimentação progressiva que, executado com critério e muito cuidado, resulta em economia substancial numa análise global do projeto (SENÇO, 2007).

Os dados contidos na Tabela 1 fornecem uma orientação para a fixação das larguras das diversas camadas de um pavimento flexível. Observe-se que a ideia

geral é fazer com que cada camada, à exceção do revestimento, tenha um excesso de largura em relação à camada subjacente, a fim de permitir proteção lateral para essa camada (SENÇO, 2007).

As larguras das camadas devem ser estabelecidas em função da Classe de Projeto, da Região e do Tráfego Diário Médio-TDM. A partir da fixação da largura da pista, em função do número de faixas de tráfego ou faixas de rolamento necessárias, que é a largura da camada de revestimento, as demais camadas deverão apresentar larguras crescentes, de cima para baixo, obedecendo uma regra geral aproximada, de 1 metro de acréscimo de uma para outra. Assim, para um revestimento de pista simples de 7,0 m de largura — duas faixas de tráfego, de 3,50m cada uma —, a base teria 8 m de largura, a sub-base, 9 m e o reforço 10 m ou 11 m.

Classe	Região								
	Plana			Ondulada			Montanhosa		
	Rev.	Base	Sub-base ou regul.	Rev.	Base	Sub-base ou regul.	Rev.	Base	Sub-base ou regul.
I-B e II	7,00	9,00	12,00	7,00	9,00	11,00	7,00	9,00	10,00
III	6,00	8,00	10,00	6,00	8,00	9,00	6,00	8,00	8,40
e	a	a	a	a	a	a	a	a	a
IV	7,00	9,00	11,00	7,00	9,00	10,00	7,00	9,00	9,40

Tabela 1: Largura das camadas do pavimento (m).
Fonte: (SENÇO, 2007).

A Tabela 2 apresenta as larguras das faixas de rolamento ou faixas de tráfego — onde se dá, com segurança, o deslocamento de uma fileira de veículos — constantes das Normas para o Projeto Geométrico de Estradas de Rodagem, do DNER. Verifica-se que os pavimentos de estradas destinadas a receber grandes volumes de tráfego, Classe de Projeto 0, têm faixas de 3,75 m — 3,60 m para região montanhosa— enquanto o mínimo de largura é de 3,00 m para estradas de Classe de Projeto IV em região montanhosa (SENÇO, 2007).

Classe de Projeto	Região		
	Plana	Ondulada	Montanhosa
0	3,75	3,75	3,60
I	3,60	3,60	3,60
II	3,60	3,60	3,50
III	3,60	3,50	3,30
IV	—	—	—
Desejável	3,50	3,50	3,30
Absoluta	3,30	3,30	3,00

Tabela 2: Largura das faixas de rolamento (m).
Fonte: (SENÇO, 2007).

Algumas normas de projeto, como as alemãs, estabelecem as larguras das faixas de rolamento em função da velocidade diretriz. Assim, é fixado um mínimo de 2,50 m, acrescidos de uma largura de acordo com aquela velocidade. Para $V = 100$ km/h, o excesso é de 1,25 m, dando a largura de 3,75 m (SENÇO, 2007).

2.12 Bases rígidas

Concreto de cimento - É uma mistura convenientemente dosada e uniformizada de agregados, areia, cimento e água nas dimensões previstas em projeto. É a base que mais se caracteriza como rígida, e seu dimensionamento obedece a estudos baseados na teoria de Westergaard, podendo ou não ser armada com barras metálicas. Uma placa de concreto de cimento exerce conjuntamente as funções de base e revestimento (SENÇO, 2007).

Macadame de cimento - É uma base construída com agregado graúdo — diâmetro máximo entre 50 mm e 90 mm — cujos vazios são preenchidos por um material de granulometria mais fina, o material de enchimento, misturado com cimento, para garantir, além do travamento das pedras, uma razoável ligação entre elas (SENÇO, 2007).

Solo cimento - É uma mistura de solo escolhido, cimento e água, em proporções convenientes e previamente determinadas, mistura essa que,

convenientemente uniformizada e compactada, satisfaz as condições exigidas para funcionar como base de pavimento (SENÇO, 2007).

2.13 Bases flexíveis

Bases de solo estabilizado - uma camada construída com solo satisfazendo determinadas especificações granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade cuja estabilização pode ser conseguida de forma natural ou artificial.

Quando a estabilização decorre da própria distribuição granulométrica dos grãos, permitindo a obtenção de uma base densa e relativamente impermeável, recebe o nome de base estabilizada granulometricamente. Quando a granulometria ideal é conseguida por meio da adição de pedra britada para suprir a ausência de material graúdo, a camada recebe o nome de solo brita. Essa adição e mistura do material graúdo é feita geralmente em usina.

A estabilização pode ser obtida, finalmente, pela adição de um aglutinante, como o asfalto, por exemplo, recebendo a base o nome de solo asfalto ou solo betume. (SENÇO, 2007).

Base de macadame hidráulico - O termo "macadame" retrata uma homenagem a John McAdam, engenheiro escocês que, em 1836, substituiu os serviços de assentamento de pedras pela construção de camadas de agregados devidamente comprimidas. O macadame hidráulico é uma variante do macadame original. Trata-se de uma base ou sub-base constituída de uma ou mais camadas de pedra britada, de fragmentos entrosados entre si e material de enchimento. Este último tem a função principal de travar o agregado graúdo e a função secundária de agir eventualmente como aglutinante. A introdução do material do enchimento nos vazios do agregado graúdo é feita com o auxílio de água, justificando o nome de macadame hidráulico (SENÇO, 2007).

Base de brita graduada - Trata-se de um tipo de base que ganhou a preferência entre as bases de pedra. É resultante da mistura, feita em usinas de agregado previamente dosado, contendo inclusive material de enchimento, água e, eventualmente, cimento. Guardadas as proporções, principalmente quanto à

granulometria dos materiais, é uma base que substituiu o macadame hidráulico, com grandes vantagens no que concerne ao processo de construção (SENÇO, 2007).

Base de macadame betuminoso - É a base que mais guarda os princípios construtivos de John McAdam, porém usando o betume como elemento aglutinante. Consiste na superposição de camadas de agregados interligadas por pinturas de material betuminoso. É chamada também de base negra, sendo que o número de camadas depende da espessura estabelecida em projeto. Os agregados utilizados têm granulometria que corresponde a uma relação de diâmetro de baixo para cima, podendo, inclusive, chegar-se ao nível final superior com granulometria própria de camada de revestimento (SENÇO, 2007).

Bases de paralelepípedo e de alvenaria poliédrica (por aproveitamento) - São incluídas, ainda, entre as bases flexíveis as bases de paralelepípedos e de alvenaria poliédrica. Como base, correspondem a leitos de antigas estradas que, com a maior velocidade atingida pelos veículos, deixaram de apresentar interesse, dada principalmente a trepidação e a alta sonoridade que provocam. Esses antigos revestimentos passaram a ser recapeados com misturas betuminosas, o que justifica a inclusão dessas camadas entre as bases flexíveis, por aproveitamento (SENÇO, 2007).

2.14 Revestimentos

Também chamado de capa de rolamento ou, simplesmente, capa. É a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e destina a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade da estrutura (SENÇO, 2007).

Revestimentos rígidos - Os materiais constituintes são os mesmos das bases rígidas, com condições de resistir aos esforços horizontais e distribuir esforços verticais à sub-base. No caso dos paralelepípedos rejuntados com cimento, a tomada das juntas é feita com argamassa de cimento e areia, o que dá ao conjunto alguma rigidez, justificando a classificação. O revestimento rígido por excelência, no entanto, é o revestimento de concreto de cimento. Executado em vias de importância, nos primeiros tempos da pavimentação entre nós, viu-se inteiramente eliminado dos projetos por utilização dos revestimentos flexíveis. As circunstâncias do momento exigem o retorno à utilização desses revestimentos rígidos, pelo menos como um concorrente das misturas betuminosas. O uso do óleo combustível para o aquecimento dos fornos para a produção do cimento implica, realmente, um consumo maior desse óleo, mas esse consumo extra será perfeitamente justificado pela economia obtida na redução do petróleo de base asfáltica.

Revestimentos flexíveis - Nos revestimentos betuminosos, como o nome indica, o aglutinante utilizado é o betume, seja asfalto, seja alcatrão. Têm merecido a preferência dos projetistas e dos construtores, muito embora deva ser considerada boa norma administrativa e técnica o uso do concreto de cimento, deixando alternativa válida para que as decisões não se restrinjam a um tipo único (SENÇO, 2007).

Concreto betuminoso ou concreto betuminoso usinado a quente - É o mais nobre dos revestimentos flexíveis. Consiste na mistura íntima de agregado, satisfazendo rigorosas especificações, e betume devidamente dosado. A mistura é feita em usina, com rigoroso controle de granulometria, teor de betume, temperaturas do agregado e do betume, transporte, aplicação e compressão, sendo mesmo o serviço de mais acurado controle dos que compõem as etapas da pavimentação. Em razão disso, o concreto betuminoso — concreto asfáltico, quando o ligante é o asfalto — tem sido preferido para revestimento das autoestradas e das vias expressas (SENÇO, 2007).

Pré-misturado a quente - É também uma mistura, obtida em usina, de agregado e asfalto ou alcatrão. No entanto, as especificações quanto ao Pré-

misturado a quente são menos rigorosas do que as do concreto betuminoso, quer quanto à granulometria, quer quanto à estabilidade, ou quanto ao índice de vazios. No Pré-misturado a quente, o agregado é aquecido até uma temperatura próxima da temperatura do betume — como no concreto betuminoso —, justificando o nome dado ao produto. A expressão "aquecido", assim, refere-se a uma exigência quanto ao agregado (SENÇO, 2007).

Pré-misturado a frio - Pode ser definido como a mistura de agregado e asfalto ou alcatrão, em que o agregado é empregado sem prévio aquecimento, ou seja, à temperatura ambiente. É um produto menos nobre que o Pré-misturado a quente e o concreto betuminoso (SENÇO, 2007).

Revestimento superficial betuminoso: Caracterizado por uma camada de desgaste constituída por aglutinante, como por exemplo, emulsão betuminosa, coberto por agregados de dimensões apropriadas sobre camada de material granular (BALBO, 2007).

Revestimento duplo invertido: Caracterizado por apresentar duas regas de emulsão betuminosa combinadas com duas camadas de agregados.

Os revestimentos asfálticos podem ser de vários tipos, admitindo uma correção importante com os agregados, a fim de obter uma melhor interligação e características diferenciadas à camada (BALBO, 2007).

Concreto asfáltico usinado a quente: Revestimento asfáltico à quente mais utilizado no Brasil. Constitui em uma mistura de agregados bem graduados, material de enchimento e cimento asfáltico. O processo de fabricação desse concreto é realizado em usinas sob rigoroso controle de qualidade, mantendo uma quantidade mínima de vários estruturais. Ele deverá ser aplicado numa temperatura de 140°C a 145°C, para isso alguns fatores devem ser levados em conta, como transporte e clima, permanecendo as características desejáveis do pavimento (BALBO,2007).

Pré-misturado à quente: Mistura é semelhante ao anterior, no entanto o controle qualitativo não é tão rigoroso, facilitando e barateando o processo produtivo, pelo fato de não haver agregados finos na maioria das misturas. Usado principalmente como pintura de ligação (DNIT, 2017).

Pré-misturados à frio: Consiste na mistura de agregados e ligante asfáltico a temperatura ambiente, não sendo necessária o aquecimento de nenhum dos materiais a serem utilizados. No entanto, o processo de aplicação deve ser executado com cautela devido a fraca ligação existente, permitindo a ação de intempéries. A mistura pode ser realizada em usinas misturadas ou em outros equipamentos destinados a este tipo de serviço, e o espalhamento realizado com motoniveladoras (DNIT, 2017).

Areia-Asfáltica à quente: Composta em sua maioria por agregados finos e materiais de enchimento. Utilizada em diversas camadas, como a de revestimento, regularização e base. A execução é realizada através de vidro acabadoras e o processo de compactação por meio de rolos de pneus e rolos lisos (DNIT, 2007).

Areia-asfáltica à frio: Mesma característica da areia-asfalto a quente, diferindo somente em relação ao ligante utilizado, haja vista que não há aquecimento dele. Com relação à execução, suas características se assemelham ao pré-misturado à frio, no entanto é necessário aerar a mistura antes de iniciar a compactação (DNIT, 2007).

Tratamento superficiais: Processo mais simples de revestimento, onde não é necessário nenhum tratamento em usina para a sua execução, trata-se de uma mistura de agregados e asfalto aplicados sobre base ou revestimento já existente como recapeamento. O processo de execução se resume na aplicação de material asfáltico e logo em seguida, a distribuição de agregados em toda área e por último faz-se a compactação. Pode ser realizada mais de uma camada de tratamento superficial, sendo necessária assim a redução dos diâmetros dos agregados empregados em cada camada (DNIT, 2007).

Macadame betuminoso: Semelhante ao macadame hidráulico, onde a coligação entre os agregados é realizada por meio de betume. Também pode ser realizada mais de uma camada, reduzindo as dimensões dos agregados a cada camada (DNIT, 2007).

Lama asfáltica: Não é considerado um revestimento, é uma associação de agregados miúdos, material de enchimento e emulsão asfáltica, devidamente espalhada e nivelada. Empregado principalmente no rejuvenescimento de pavimentos asfálticos ou como camada de desgaste e impermeabilizantes nos tratamentos superficiais ou macadame betuminoso, por apresentar um ótimo coeficiente de atrito, também é verificado o seu uso no tratamento de trechos lisos e derrapantes. Sua espessura final é de 4mm e sua compactação é verificada pelo próprio tráfego imposto (DNIT, 2007).

Micro revestimento: Usa-se a mesma concepção das lamas asfálticas, com a diferença que são aplicadas emulsões modificadas com polímeros para aumentar sua vida útil, é uma mistura a frio de agregados minerais, água e emulsão com polímero e eventualmente adição de fibras (DNIT, 2007).

Concreto cimento: É uma mistura convenientemente dosada e uniformizada de agregados, areia, cimento e água nas dimensões previstas em projeto. É a base que mais se caracteriza como rígida, e seu dimensionamento obedece a estudos baseados na teoria de Westergaard, podendo ou não ser armada com barras metálicas. Uma placa de concreto de cimento exerce conjuntamente as funções de base e revestimento (SENÇO, 2007).

3 CARACTERÍSTICAS DE DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO RÍGIDO

3.1 Propriedades de suportar cargas do subleito

As propriedades mecânicas do subleito fazem com que a espessura da laje de concreto a ser calculada dependa diretamente delas, principalmente do módulo

de reação do subleito (k). Este fator corresponde à capacidade suportam-te que tem o terreno natural onde será suportado o corpo do pavimento. Geralmente, é provável que se tenham diferentes valores de “ k ” ao longo do percurso que se deseje projetar, pelo que se recomenda utilizar o valor médio dos módulos para o projeto estrutural (PINHO, 2012).

3.2 Sub-base

Da sub-base também vai depender diretamente o módulo de reação do subleito, devido a que corresponde a uma capa de material granular (geralmente) na qual se apoiam as capas superiores do pavimento. O aporte da sub-base tende a incrementar o módulo de reação do subleito, já que lhe adiciona capacidade de suporte à capa subleito (DNIT, 2009).

3.3 Condições climáticas

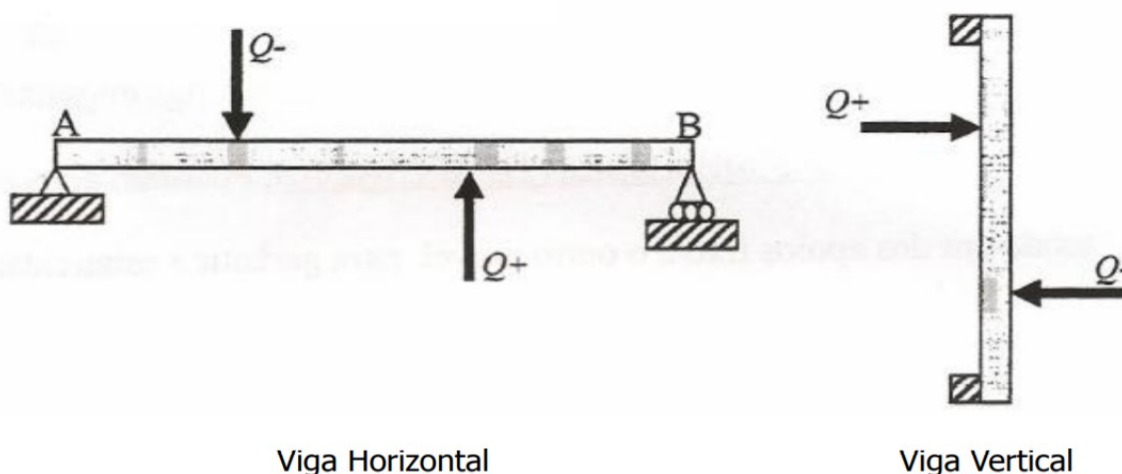
As condições climáticas devem sempre ser consideradas no projeto de pavimentos rígidos, devido a que estas influem diretamente em suas propriedades durante as etapas de construção e manutenção das estruturas, por sua constante exposição à intempérie. Os principais parâmetros que afetam um pavimento são a temperatura e as precipitações, devido a que, por exemplo, as constantes mudanças de temperatura fazem com que o concreto hidráulico se contraia ou se expanda, tornando possível o aparecimento de rachaduras nas lajes de concreto. Ou também, com as precipitações, que com as mudanças de umidade no ambiente e a presença da água fazem com que a superfície do pavimento tenha erosão ou que a água se infiltre pelas juntas, debilitando o pavimento e existindo mais possibilidades de ocorrência de deterioramentos (SOMAR METEOROLOGIA, 2016).

3.5 Propriedades mecânicas do concreto

O concreto possui características e propriedades necessárias para ser na atualidade o material mais utilizado no mundo para a construção. Contudo, também apresenta variedades dependendo dos componentes com os quais seja fabricado, das proporções requeridas e das condições e cuidados que sejam consideradas na hora da construção e manutenção das obras. Entre estas propriedades e características se encontram trabalhabilidade, resistência, impermeabilidade, durabilidade, elasticidade, entre outras (CERVO, 2004).

Para efeitos de projeto de um pavimento rígido, há que ter presente especificamente duas propriedades, as quais são relevantes no comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil. As seguintes propriedades, junto com a espessura da laje de concreto, definem a capacidade de suporte do pavimento ao resistir às tensões que ocorrem em cada uma das lajes devidas às deformações no material e às cargas de trânsito (CERVO, 2004).

Os esforços cortantes são cargas que tende a provocar cisalhamento da estrutura e conseqüente flexão dela pois o comprimento da barra não é desprezado. O esforço cortante é representado neste curso por Q , e, pode ser, positivo ou negativo (figura 3), a figura abaixo representa o mesmo que acontece com as camadas dos pavimentos tanto rígidos quanto flexíveis sendo dimensionados para resistirem as forças cortantes. dependendo da convenção de sinais adotada (MARCHETTI, 2013 - ADAPTADO).



Viga Horizontal

Viga Vertical

Figura 11: Resistência à flexão.
 Fonte: (MARCHETTI, 2013).

As cargas aplicadas sobre o pavimento de concreto atuam sobre ele de tal forma que fazem com que este se flexione, pelo que o concreto utilizado deve ser resistente à flexão. Ao flexionar-se uma laje, sua face inferior vai ser tensionada, pelo que o concreto deve ser resistente à tração, contudo em menor medida, devido a que o concreto naturalmente não resiste a estes esforços. Pode ser definido como o momento resultante de todas as forças que são aplicadas na estrutura (figura 14). Quando se trata de flexão, é possível conhecer o valor do momento fletor em cada ponto da estrutura. O momento fletor também pode ser positivo ou negativo (MARCHETTI, 2013).

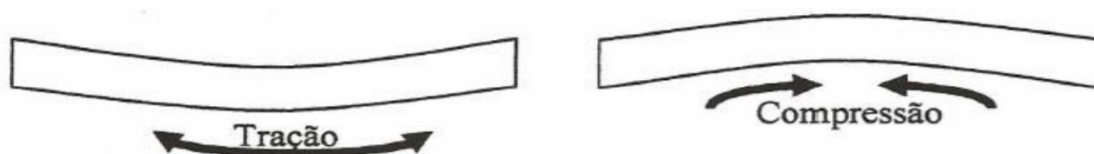


Figura 1211: Momento fletor em uma camada.
 Fonte: (MARCHETTI, 2013).

Quando o módulo de elasticidade do concreto é especificado como parâmetro de recebimento e aceitação de uma estrutura de concreto, a aferição desta grandeza pelos laboratórios brasileiros é realizada através da tomada de medidas de deformação do concreto diretas na geratriz do corpo de prova, conforme estabelecido pelos procedimentos da ABNT NBR 8522:2008, módulo estático de elasticidade, que tanto pode fornecer o módulo tangente inicial ou o módulo secante (MARCHETTI, 2013).

O módulo de elasticidade do concreto se relaciona diretamente com seu módulo de ruptura e é determinado mediante a norma ASTM C469. Esta propriedade controla a maneira de falha a ruptura que terá a laje de concreto e sua capacidade de se deformar pela carga aplicada antes que seja produzida uma rachadura (MARCHETTI, 2013).

3.6 Cargas e eixos equivalentes

Todos os aspectos que conduzem uma estrada, tais como o tipo de vitalidade, as interseções, as larguras de calçada, os acessos, os serviços, a espessura do pavimento e demais propriedades, dependem diretamente do volume de trânsito com o qual se vai trabalhar; ou dito em outras palavras, da demanda de veículos que circulará durante um intervalo determinado, assim como sua taxa de crescimento, sua variação e sua composição. Os estudos relacionados com os volumes de trânsito são realizados com o objetivo de obter todos os dados possíveis sobre os veículos que transitam, suas características e movimento sobre determinados pontos dentro de um sistema de vias. Ditos dados de trânsito tornam possível que sejam obtidas estimativas fundamentadas das condições do serviço dado aos usuários. Trânsito médio diário – TMD, define-se como o número total de veículos que passam por um lugar durante um período específico, que tem que ser igual ou menor a um ano e maior que um dia. O trânsito sempre deve ser considerado dinâmico, não estático, uma vez que a ação das cargas sobre as estruturas é diferente acompanhadas de constantes vibrações (SENÇO, 2007).

3.7 Transferência de cargas

As cargas são transferidas e resistidas pelas camadas inferiores que recebem ou distribuem as cargas, provenientes do trânsito, a suas camadas adjacentes, com a finalidade de diminuir o impacto de ditas cargas no pavimento, refletidas nas deformações e esforços presentes. Entre as camadas são criadas forças cortantes, produto da ação das cargas de trânsito, as quais são transmitidas de uma a outras camadas por camada (BALBO et al. 1996).

Um pavimento rígido é projetado para que suporte grande quantidade de cargas aplicadas e a passagem de milhões de eixos equivalentes totais, além de que a vida útil destas estruturas pode ser de várias décadas. A resistência e capacidade de suporte dependem principalmente do tipo de concreto hidráulico a ser utilizado e da espessura da laje do mesmo material, e quanto maior seja esta espessura sua capacidade de suporte aumentará substancialmente. Ao incrementar a espessura da laje de concreto aproximadamente em 2,5 cm, por sua vez se aumenta também o dobro a capacidade de carga desse pavimento, quer

dizer, um pavimento que, por exemplo, tenha uma espessura de laje de concreto de 30,5 cm suporta 400% mais que um pavimento de 25,5 cm (PITTA,1998).

4 DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL

O dimensionamento de um pavimento consiste basicamente na determinação das espessuras das camadas da estrutura desse pavimento, visando atender o número N. Para esse dimensionamento será essencial o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). Atualmente no Brasil, o método mais empregado é o que foi desenvolvido pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza, na década de 70, conhecido como Método do CBR ou Método do DNER. O método do DNER utiliza ábacos que relacionam valores de tráfego com dados dos materiais do subleito para cada tipo de pavimento.

4.1 Determinação do ISC

O Índice de Suporte Califórnia ou CBR é o fator mais importante para o cálculo de qualquer pavimento. A norma que define as diretrizes para o ensaio para a determinação do CBR é a NORMA DNIT 172/2016 – ME.

4.2 Determinação do número N

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto (p)escolhido.

- prazo de duração do pavimento;
- tipo de veículos que vão transitar pela via;
- cargas por eixo de cada tipo de veículo;
- quantidade de veículos que deverá transitar pela via, em termos médios.

onde:

O número equivalente de operações do eixo simples padrão, N, durante o período de projeto é dado por:

$$N = V_t \cdot FE \cdot FC$$

$$FE \cdot FC = FV$$

$$N = V_t \cdot FV$$

Onde:

V_t = número de veículos comerciais que solicitarão o pavimento durante o período de projeto;

FE: Fator de eixos;

FE: % veículos de dois eixos x 2 + % veículos de 3 eixos x 3 + % veículos de 4 eixos x 4 + ...

FC: % de cargas por eixo (simples e tandem) x FEO (definido pelos ábacos)

FV: Fator de veículo

Para a determinação dos fatores de equivalência para posterior cálculo do fator de carga os ábacos necessários estão apresentados abaixo.

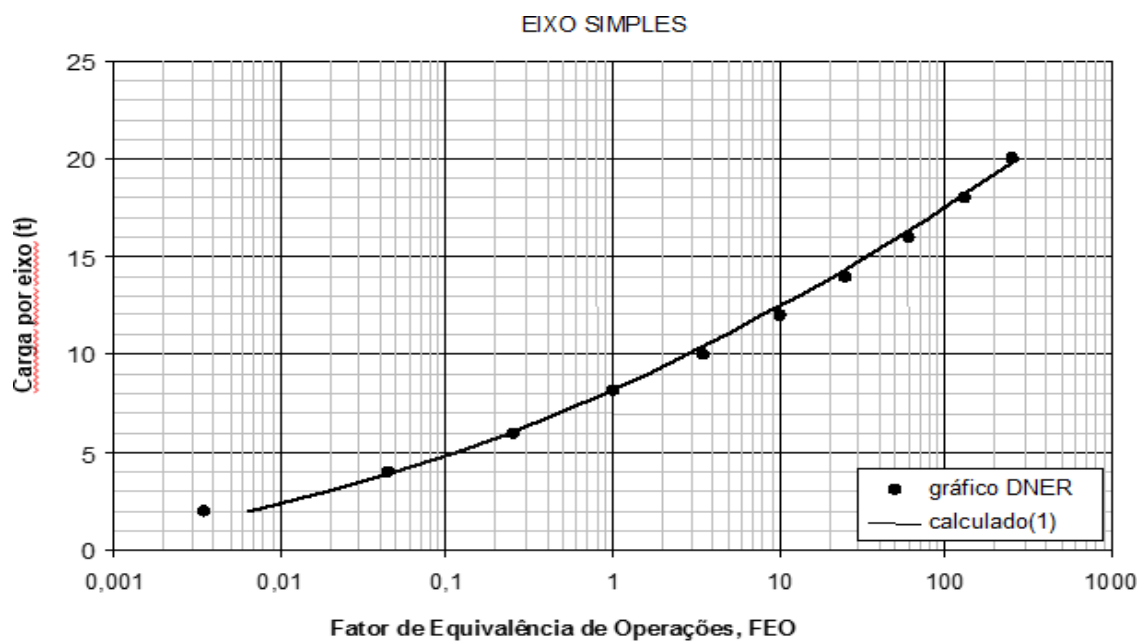


Gráfico 1: Fator de equivalência de operações, FEO - Eixo simples.

Fonte: (DNIT, 2006).

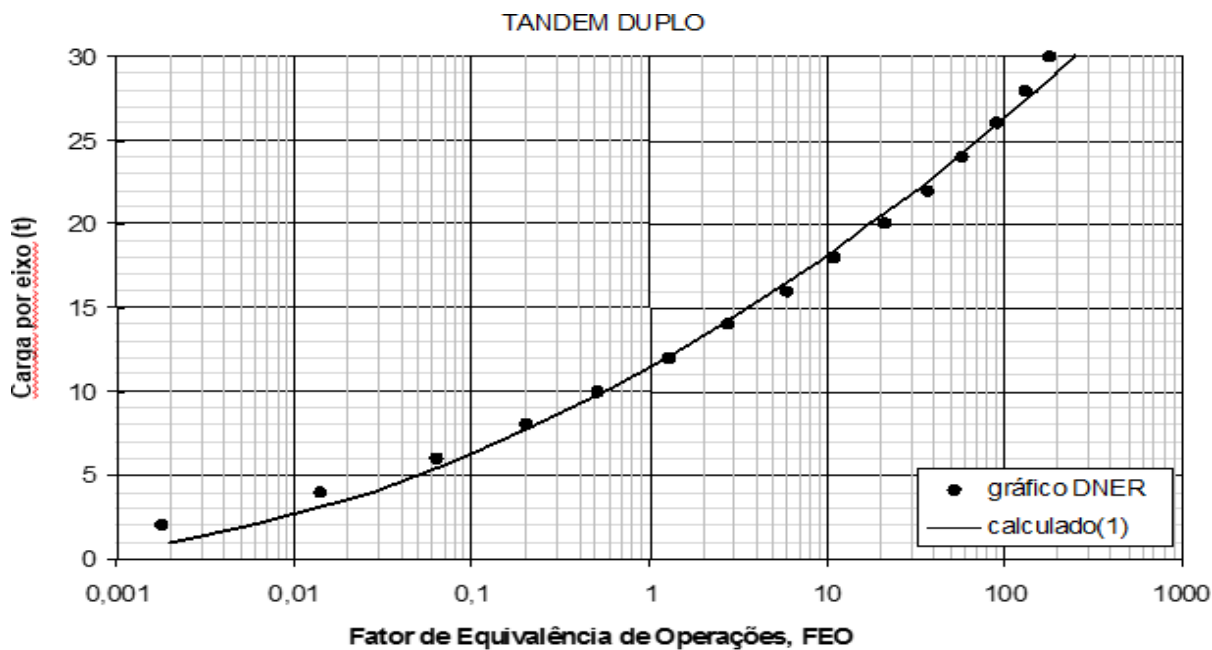


Gráfico 2: Fator de equivalência de operações, FEO - Tandem duplo.

Fonte: (DINT, 2006).

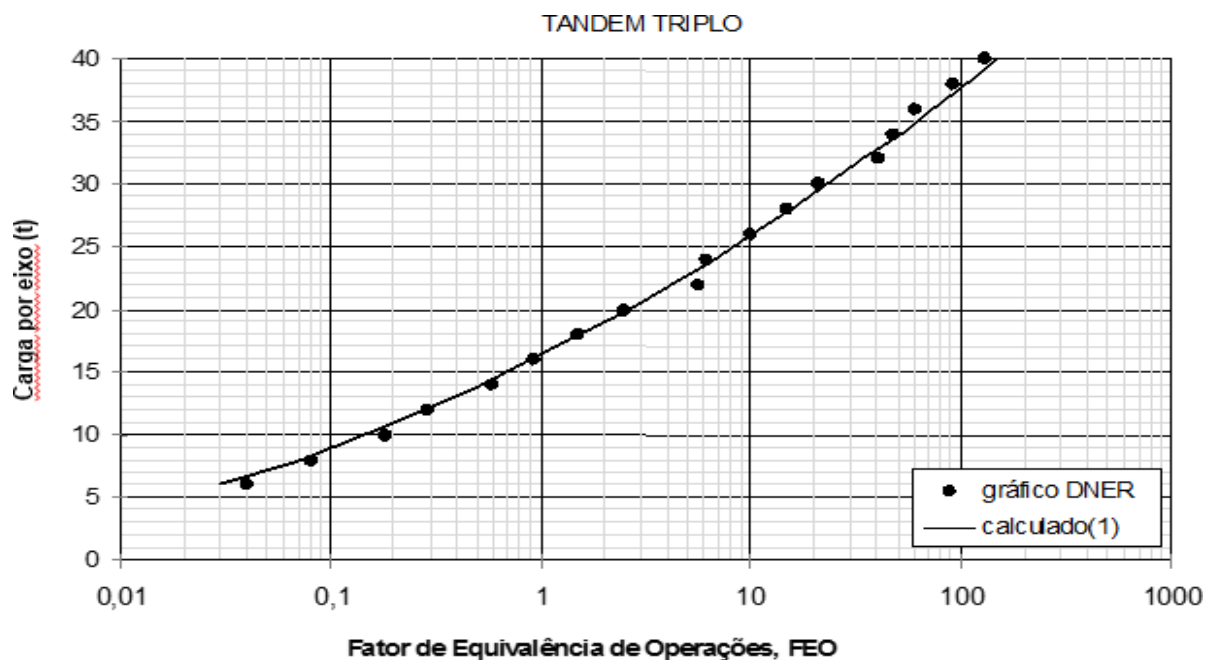


Gráfico 3: Fator de equivalência de operações, FEO - Tandem triplo.
Fonte: (DNIT, 2006).

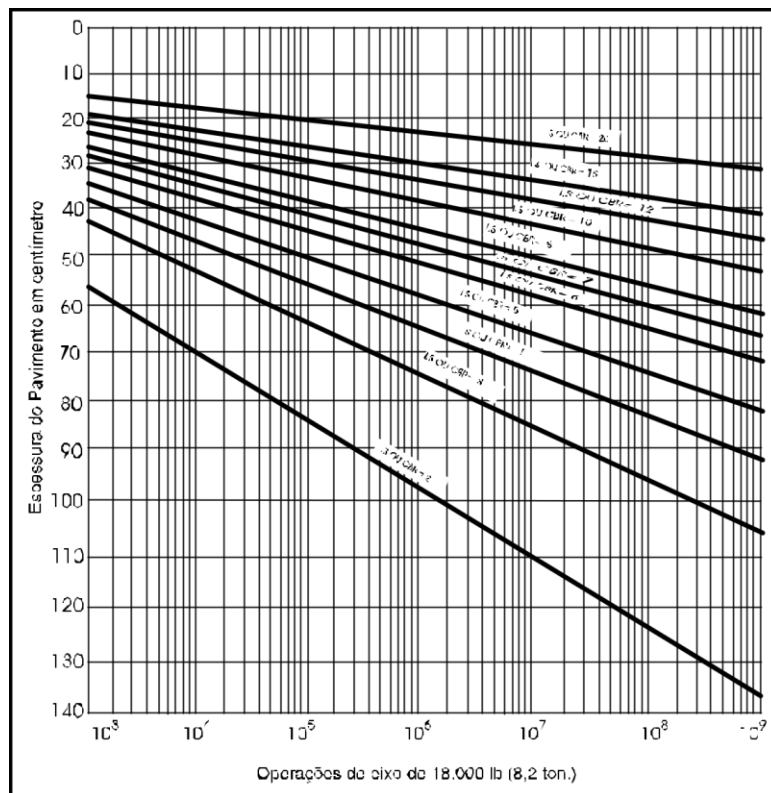
4.3 Coeficiente de equivalência(k)

O coeficiente de equivalência é uma constante que será determinado para cada camada do pavimento, que irá variar de acordo com o tipo de material e camada que adotada (Tabela 6).

Componentes do pavimento	K
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistência a compressão a 7 dias > 45 kgf/cm ²	1,7
Idem, com resistência a compressão a 7 dias entre 45 e 28 kgf/cm ²	1,4
Idem, com resistência a compressão a 7 dias entre 28 e 21 kgf/cm ²	1,2
Bases de Solo-cal	1,2

Tabela 3 : Coeficiente de equivalência K
Fonte: (DNIT, 2006).

O Gráfico 4 relaciona, para valores de CBR ou IS, valores de espessura com coeficiente de equivalência estrutural $k = 1,0$, com número de operações do eixo padrão de 8,2 t.



Uma vez determinadas as espessuras H_m , H_n e H_{20} pelo gráfico da figura 13 e R pela tabela de espessura mínima de revestimento, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$Rk_R + Bk_B > H_{20}(1)$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_S > H_n(2)$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_S + h_nk_{Ref} > H_m(3)$$

Espessura H_m = espessura total para um material com CBR = m

Espessura h_n = espessura da camada com CBR = n

B e R designam, respetivamente, as espessuras da base e do revestimento.

- Os coeficientes estruturais são designados por:
- Revestimento: k_R
- Base: k_B
- Sub-base: k_S
- Reforço: k_{Ref}

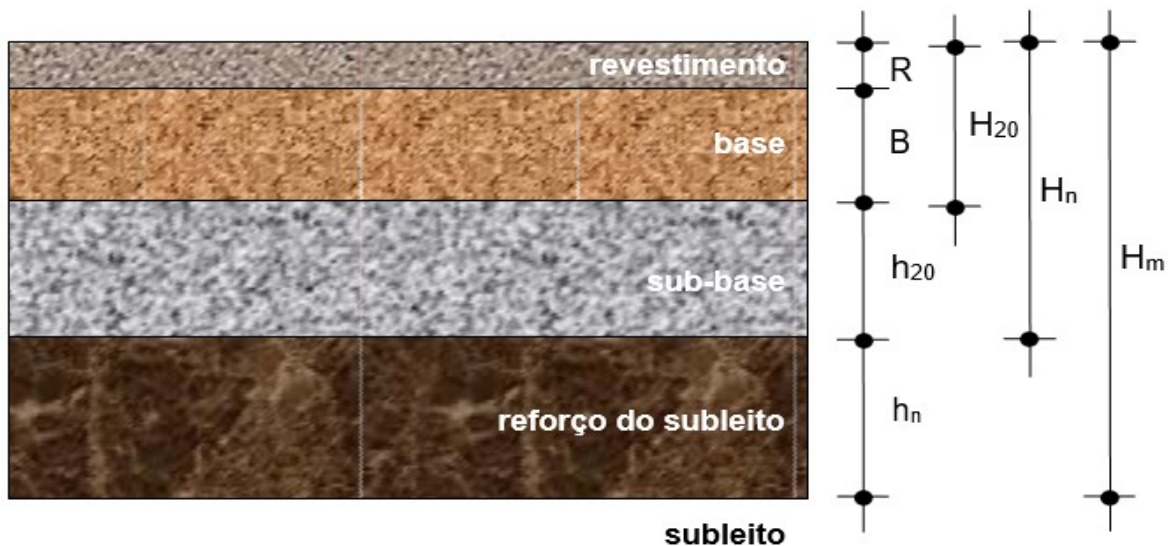


Figura 13: Espessuras das camadas e nomenclaturas.
Fonte: (DNIT, 2006).

4.4 Características do pavimento flexível

Os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada superficial asfáltica – revestimento, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentante, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, ou seja, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes e com pressões concentradas (DNIT, 2006).

Com relação aos materiais utilizados nos pavimentos flexíveis, os agregados correspondem entre 90% e 95% do revestimento, responsável por suportar e transmitir cargas aplicadas pelos veículos e resistir ao desgaste sofrido pelas solicitações. O material betuminoso, corresponde entre 5% e 10% do revestimento, tendo função aglutinante e ação impermeabilizante (BERNUCCI et al. 2010).

Dentre os tipos de revestimento dos pavimentos flexíveis, existem as misturas usinadas, essa mistura de agregados e ligante é feita em uma usina estacionária, e posteriormente transportada para o local de utilização, um dos tipos mais utilizados no Brasil é o concreto asfáltico usinado a quente (BERNUCCI et al).

4.5 Resistência a derrapagem e drenagem

A resistência à derrapagem se dá primordialmente pela textura da capa de rodagem que permite proporcionar um bom coeficiente de fricção pneumática pavimento e por uma boa drenagem superficial que impeça a formação de uma lâmina de água sobre a superfície de rodagem, evitando assim a aquaplanagem. (BOTELHO, 2013).

A microtextura é definida como o desvio que apresenta sua superfície com respeito a uma superfície plana de dimensões características em sentido longitudinal inferiores a 0,5 mm, e é uma característica intrínseca do agregado, é propriamente a textura superficial das partículas de agregado e tende a ser reduzida com o tempo pela ação abrasiva do trânsito veicular e o clima, a esta diminuição é conhecida como polimento, e depende da composição mineralógica dos agregados, por exemplo, os agregados calcários são muito suscetíveis a polir (BOTELHO, 2013).

Com uma boa seleção de materiais e a tecnologia atual de projeto e construção de pavimentos asfálticos têm-se agora uma gama de opções que

permitem obter superfícies de rodagem com excelentes características de resistência a derrapagem, atendendo tanto à textura como a drenagem superficial. As capas drenantes, as mesclas de granulometria descontínua, e ainda as mesclas densas foram empregadas em nível mundial com bons resultados. Também se têm boas opções para os problemas de superfícies deslizantes com base em tratamentos superficiais. Contudo, na prática nacional persiste o costume de empregar agregados locais por razões de custo inicial, ainda que não tenham características adequadas, além que as novas tecnologias de projeto e construção de mesclas ainda não estão o suficientemente estendidas. Por isso é frequente encontrar superfícies com problemas de derrapagem de origem, que se vão agravando com o tempo ao aparecer o fenômeno de polimento que impedem uma drenagem adequada, incrementando assim o risco de aquaplanagem (DNIT, 2016).

4.6 Capacidade estrutural do pavimento flexível

Tradicionalmente, os pavimentos flexíveis foram concebido para vidas de projeto estimadas entre 10 e 15 anos, contudo, erros nos projetos, o emprego de materiais com qualidade insuficiente, processos de construção obsoletos, controle de qualidade insuficiente, falta de controle nos pesos veiculares, entre outros fatores provocam que seja frequente que os pavimentos não cheguem à vida útil esperada. Em alguns lugares do mundo é comum encontrar que os pavimentos flexíveis sejam projetados para durar entre 20 e 30 anos, sendo comum que se alcance cumprir com estas expectativas (PESSOA JR, 2019).

Avanços na tecnologia de modificação de ligantes asfálticos em projeto de estradas e uso de materiais oriundos de petróleo com melhor qualidade permitiu na atualidade maior resistência com material mais denso, com a tecnologia atual é possível alcançar resistências com módulos dinâmicos superiores aos 10.000 Mpa, o triplo que são obtidas com a convencional, assim estes avanços tecnológicos permitiram aos projetos uma maior qualidade e precisão na execução atingindo suas expectativas iniciais de projeto, resistindo por mais tempo a rachaduras por fadiga (PESSOAJR, 2019 - ADAPTADO).

4.7 Reciclagem

A reutilização de mesclas asfálticas, que cumpriram com sua vida útil, foi de uso comum por um longo tempo, os avanços tecnológicos permitiram uma ampla gama de opções para a utilização dos materiais recuperados dos trabalhos de reabilitação de pavimentos flexíveis, estes materiais podem ser empregados, tanto em capas estruturais como em superfícies de rolamento, formando parte de mesclas a quente, mesclas mornas, mesclas a frio, em capas de base estabilizada ou como parte de uma base granular (MOURA, 2016).

4.8 Manutenção

Como qualquer obra de engenharia civil os pavimentos flexíveis requerem que as ações de manutenção sejam adequadas e oportunas para que ofereçam um bom serviço durante a vida útil projetada. Os equipamentos modernos de auscultação podem proporcionar informação abundante e precisa para observar as condições em que se encontram, tanto no estrutural como no funcional, assim como a evolução destas características. Os avanços na tecnologia oferecem uma gama muito ampla de alternativas de manutenção, tanto com materiais de melhor qualidade como em procedimentos, mas eficientes, adicionalmente os sistemas de gestão, alimentados com informação adequada podem ser uma ferramenta muito valiosa para otimizar a aplicação dos recursos disponíveis (PESSOA JR, 2019).

5 COMPARAÇÃO ENTRE PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL

Os pavimentos rígidos trabalham de uma maneira diferente dos flexíveis, distribuindo os esforços solicitantes do tráfego por uma área maior, ao invés de concentrá-los no ponto de aplicação como nos flexíveis, dessa maneira, tem uma durabilidade muito maior em comparação com os pavimentos flexíveis chegando em torno 30 anos contra 10 anos respectivamente, compensando o maior custo do concreto utilizado, em comparação com o asfalto. pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é constituído por placas de concreto de cimento

Portland. Revestimento este que possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores e espessura fixa em função da resistência à flexão das placas, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento (BERNUCCI, 2007).

5.1 Pavimentos Rígidos

A pavimentação rígida por ter melhor capacidade de distribuir as tensões advindas do tráfego, requer menos de sua fundação, economizando esforços e custos em serviços como reforço de subleito, geralmente empregado nos pavimentos flexíveis. Ignorando um estudo de caso específico para cada região e observando apenas os aspectos estruturais a pavimentação rígida é mais indicada para solos pouco resistivos, onde seriam necessários grandes serviços de melhoramento dele. Já a pavimentação flexível é mais indicada para solos capazes de resistir a cargas provenientes do tráfego, suprimindo boa parte dos serviços e camadas necessárias a este tipo de pavimento. (DNIT,2006)

Pavimento rígido terá uma durabilidade maior, por requerer uma menor manutenção e economia ao longo do ciclo de vida. A durabilidade do pavimento concreto é três vezes maior que a do pavimento flexível (figura 18), porque o pavimento de concreto ganha resistência com o passar do tempo, enquanto o flexível perde sua resistência inicial (DNIT, 2004).



Figura 14: Diferença de tempo para reabilitação.
Fonte: (BRAVO; MOINA, 2017).

O efeito da ilha de calor, o que significa que as cidades são mais quentes que as zonas que se encontram ao redor delas. Isto pode favorecer o desenvolvimento de enfermidades, moléstias e aumento do uso do ar condicionado para responder a temperatura. O concreto hidráulico, ao ser um material de cor mais clara que a mistura asfáltica, absorve em menor quantidade o calor emitido pelos raios do sol, contribuindo para que se reduza a temperatura nas cidades, conforme mostra a Figura 15 (PESSOA JR, 2019).

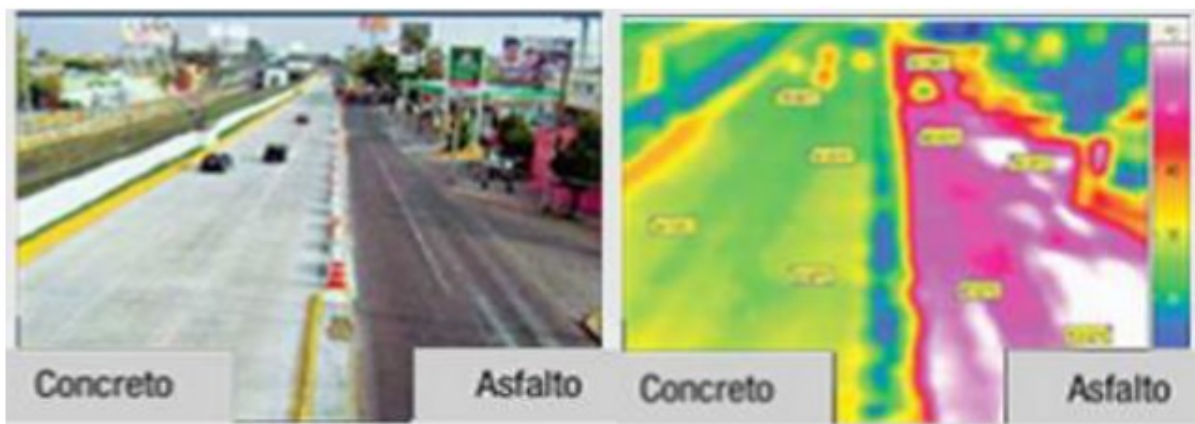


Figura 125: Temperatura em pavimentos.
Fonte: (BRAVO; MOINA, 2017).

Uma estrutura de pavimento rígido não requer de camadas de suporte, como é necessária em um pavimento flexível, que além da capa asfáltica requer uma base e uma sub-base para contribuir com o suporte e distribuição das cargas que lhe são aplicadas. Um pavimento de concreto pode ser apoiado diretamente sobre o subleito, contudo geralmente é colocada sobre uma sub-base granular para impedir que a água e material fino do subleito sejam filtrados pelas juntas entre as lajes, conforme demonstram as Figuras 16 e 17 (PESSOA JR., 2019).



Figura 16: Efeito de deflexão em pavimentos.
Fonte: (BRAVO; MOINA, 2017).

Pavimentos de concreto são estáveis e previsíveis, devido a menor quantidade de camadas necessárias à resistir as mesmas cargas que os pavimentos flexíveis, além de se encontram estreitamente relacionados aos cuidados com preparo e influência do petróleo internacional, os quais variam conforme a demanda mundial e pode elevar os custos comparado com o pavimento rígido. Em troca, o pavimento de concreto segue a dinâmica nos custos à médio e longo prazo (MOURA, 2017- ADAPTADO).

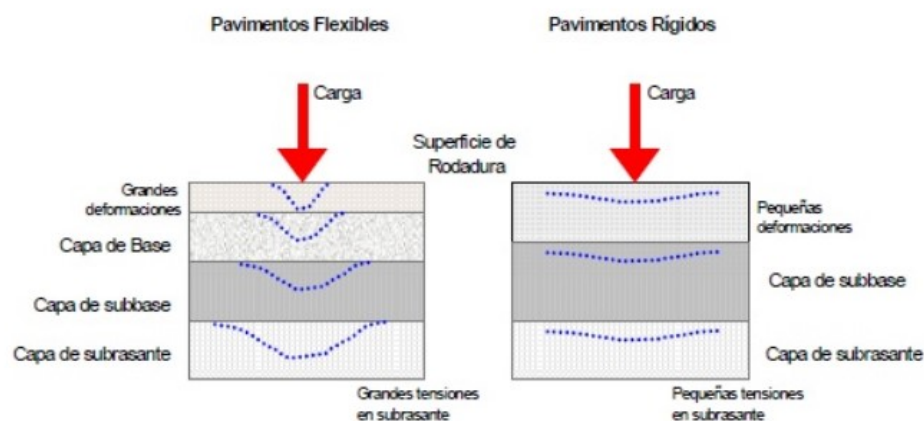


Figura 17: Camadas de suporte
Fonte: (BRAVO, 2017).

O concreto de concreto é mais resistente com o contato de diferentes líquidos químicos presentes no ambiente das estradas, tais como água ou derrames de óleos, gasolina e demais líquidos provenientes dos veículos, somando-lhe os efeitos da intempérie (COSTA, 2018).

O ligante asfáltico se vê afetado pela temperatura, devido a que é um material termoplástico, visto que sua consistência muda com a temperatura, o que incide em suas propriedades e o deforma permanentemente. Pelo contrário, o concreto hidráulico pode resistir a altas e baixas temperaturas sem ver-se afetadas sua resistência, tampouco perde parte de seus componentes porque não contém elementos voláteis como os tem a mistura asfáltica (PESSOA, 2019).

O pavimento flexível comumente pode apresentar deformações em zonas onde os veículos freiam e arrancam, deformações como ondulações ou corrugações, algo que não sucede no pavimento rígido porque não se deforma ou apresenta deformações mínimas, não é um material plástico como o asfalto (SENÇO, 2008).

Uma vantagem de se deformar é que não acumulam ou empoçam a água. Isto é facilmente visto nas estradas e ruas com pavimento flexível em nosso país, onde se formam, de maneira muito comum, poças ou charcos de água. Com relação à segurança nas estradas, os pavimentos rígidos podem ser considerados mais seguros devido a que reduzem o efeito de aquaplanar, o deslizamento dos veículos em superfícies molhadas produto das deformações da superfície. Menciona-se que os pavimentos flexíveis podem ser mais rugosos, modificando sua textura, contudo geralmente são mais suscetíveis ante este fenômeno (COSTA, 2018).

Os sinais e demais marcas feitas com pintura sobre a superfície de rolamento são mais fáceis de serem lavadas pela chuva ou pelo rolamento dos veículos em um pavimento flexível do que um rígido. Construir uma estrada com pavimento rígido também requer menos iluminação que o pavimento flexível, conforme demonstra a Figura 18, com aproximadamente 30% menos a quantidade de luminárias requeridas, devido o pavimento de concreto ser claro, refletindo melhor a luz e dando maior visibilidade ao usuário e diminuindo o consumo de energia na iluminação das vias (PESSOA JR, 2019 - ADAPTADO).

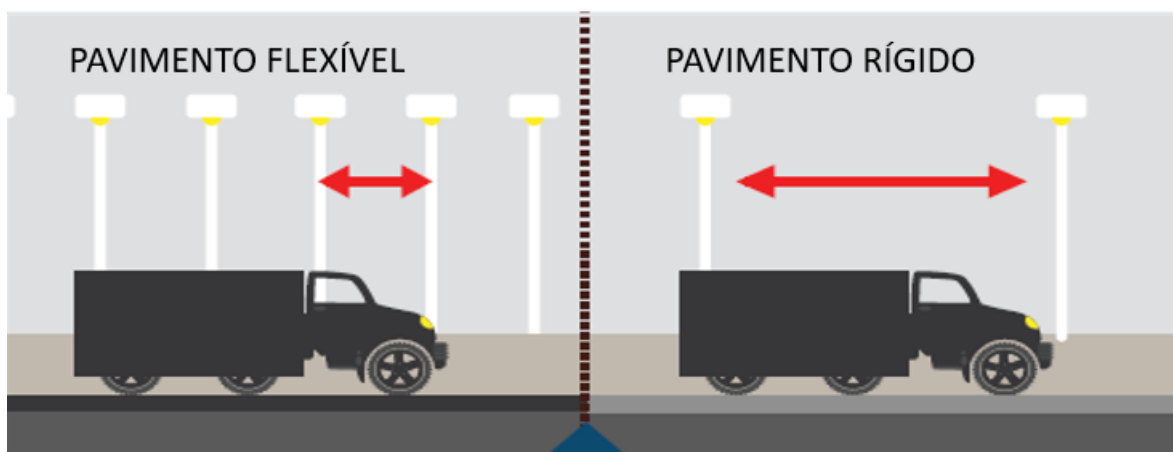


Figura 18: Iluminação pública em pavimentos.
 Fonte: (BRAVO; MOINA, 2017).

Economiza-se energia quando da fabricação do pavimento rígido em comparação com o pavimento flexível, visto que a mistura asfáltica deve se submeter a altas temperaturas em sua elaboração. Também deve permanecer alta a temperatura durante o transporte e execução, devido a uma temperatura mínima à qual deve ser compactada (COSTA, 2018).

O pavimento flexível pode ser desmoronado facilmente, porque o ligante asfáltico perde a capacidade de aglutinar aos agregados pelo contato com agentes ambientais ou substâncias daninhas, contudo isto depende de se a característica do asfalto está bem projetada caso contrário, o pavimento de concreto tem essa vantagem sobre a mescla asfáltica, é resistente a agentes ou substâncias daninhas e ambientais (COSTA, 2018).

O pavimento rígido tem a vantagem que, durante sua construção, pode empregar equipamentos tecnológicos diversos o que diminuiria o requerimento de mão de obra, o que aceleraria os processos, beneficiando os tempos de obra. Além disso, o pavimento rígido pode ser construído em uma só passada devido a que não é uma estrutura de capas múltiplas como o pavimento flexível (PITTA, 1998).

Em termos de manutenção de pavimentos, o concreto hidráulico pode ser utilizado para realizar reparações de maneira eficiente, já que pode ser colada uma sobrecapa de uma determinada espessura sobre um pavimento flexível deteriorado (whitetopping) ou outra superfície devidamente preparada, garantindo uma estrutura de excelentes características e, geralmente dependendo do projeto, mais durável que uma camada asfáltica (PITTA, 1998).

5.2 Pavimentos Flexíveis

O pavimento flexível também possui distintas características vantajosas a respeito do pavimento rígido. Os benefícios mais destacados são que o pavimento flexível, geralmente, é menos caro que o pavimento rígido considerando à construção inicial de cada um deles, o pavimento flexível é mais recomendável para estradas com volumes baixos de veículos sendo mais adequado que um pavimento rígido. O pavimento de concreto necessita de juntas entre as lajes; pelo que, se não forem construídas, o pavimento é propenso a rachar-se. Pelo contrário, o pavimento flexível é muito mais flexível que o pavimento rígido, fazendo possível sua construção como uma estrutura contínua (BALBO, 2007).

Em geral, as atividades de manutenção para o pavimento de concreto asfáltico são bastante simples além de que não se requerer muito tempo para executá-las e o trânsito poder voltar em pouco tempo, outra vantagem é que o pavimento flexível pode entrar em operação poucas horas depois de ser construído, o que facilita a circulação do trânsito e rapidez de construção, diferentemente do pavimento rígido. O pavimento de concreto asfáltico possui maior valor de resgate ao final do período de projeto da estrutura, comparado com o pavimento de concreto de cimento portland, onde para realizar a construção do pavimento flexível realiza-se em várias etapas, não de maneira contínua como o pavimento rígido (SENÇO, 2007).

6 METODOLOGIA

Foi realizado um estudo bibliográfico apresentando uma análise comparando os pavimentos rígidos e flexíveis, a busca por suas técnicas de dimensionamento, aplicações visando os métodos de dimensionamentos seguindo conceitos aplicáveis nos dois tipos de pavimentos mostrando resultados satisfatórios com as características de cada um deles. As bibliografias consultadas nos levaram a um levantamento de dados detalhando as características e comportamentos das camadas dos pavimentos quando

receberem as cargas ao longo do tempo de projeto, analisando processos construtivos, suas especificações, diferenças de espessuras das camadas, custos e sua estrutura mostraram o quão importante se faz o estudo dos pavimentos e suas técnicas de aplicação, entretanto, para um conhecimento específico a uma região ou a escolha de qual pavimentação projetar, é necessário um aprofundamento dos dados apresentados nesta obra. Entretanto, obtemos um conhecimento técnico que nos torna capazes de entender melhor o funcionamento e dinâmica da pavimentação rígida e flexível. Buscamos apresentar nesta monografia as diferenças nos dimensionamentos de projeto em pavimentos de concreto e pavimentos betuminosos de infraestrutura rodoviária, com base nas bibliografias consultadas, e critérios técnicos, foram apresentados os principais conceitos aplicáveis nos projetos de infraestrutura rodoviária.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentamos nesta monografia uma análise com objetivo de comparar, conhecer e apresentar os pavimentos rígidos e flexíveis, realizando uma busca em bibliografias, revistas científicas e sites de engenharia e infraestrutura de pavimentação para obter com detalhes o dimensionamento, estrutura, comportamentos e resistências.

A pesquisa apresentada cita algumas vantagens que o pavimento de concreto apresentou em relação ao pavimento flexível no que se refere ao coeficiente de atrito, oferecendo maior atrito entre pavimento e pneus assim oferecendo uma maior segurança quanto derrapagem onde os veículos precisam de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, 40% em superfície molhada, melhor difusão de luz permitindo até 30% de economia nas despesas de iluminação, melhores características de drenagem superficial, redução no consumo de combustível de até 20% em veículos pesados e por melhores características de distribuição de tensões onde requer menos de sua fundação gerando economia de custos em serviços como reforço do subleito, geralmente necessário para pavimentação flexível. Com isso observamos um melhor resultado de desempenho frente ao pavimento flexível que pode ser uma opção mais viável economicamente inicialmente, no entanto o pavimento de

concreto possui qualidades mais relevantes quando utilizado como pavimento em casos de grandes solicitações, conforme Quadro 1.

PAVIMENTOS RÍGIDOS	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
Estruturas mais delgadas de pavimentos	Estruturas mais espessas o que requer maior escavação e movimento de terra e múltiplas camadas.
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas e combustíveis)	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleos, graxas e combustíveis)
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções.	Necessário que façam várias manutenções e recuperações, com prejuízo ao tráfego e custos elevados.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade.	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável).
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção).
Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfícies seca, em condições molhadas 40%).	A superfície é muito escorregadia quando molhada.
Tem coloração clara, tem melhor difusão de luz. Permite até 30% de economia nas despesas de iluminações da via.	Com coloração escura, tem baixa reflexão de luz. Maiores gastos com iluminação.
O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio e a energia consumida é a elétrica.	O asfalto é derivado de petróleo importado, misturado normalmente a quente, consome óleo combustível e divisas.
Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial.	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos.
Mantém íntegra a camada de rolamento, não sendo afetado pelas intempéries.	Altas temperaturas ou chuvas abundantes produzem degradação.
Requer execução de juntas de dilatação e manutenção das mesmas a cada 10 ou 15 anos.	Não necessita de junta de dilatação, porém requer manutenção num período menor que 10 anos.

Quadro 1- Comparação dos pavimentos.

Fonte: (IBRACON, 2019 - Adaptado)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pavimentos são estruturas compostas por camadas projetadas para resistir aos esforços oriundos dos veículos e dimensionados com propriedades específicas a cada camada, base, sub-base, reforço do subleito e a camada de regularização. As condições de tráfego, efeitos ambientais dos quais estará submetido durante sua vida útil em serviço, as propriedades dos materiais, técnicas de construção e políticas de manutenção afetam o desempenho do pavimento. Tecnicamente o custo de execução de um pavimento flexível é menor ao de um pavimento rígido, contudo, é necessário avaliar a zona em que se executará a obra as condições climáticas e o tráfego que se terá durante seu período de vida útil. Pavimentar uma via garante a ela requisitos como conforto e segurança, buscar cada vez mais pavimentos de boa qualidade, com as melhores características possíveis significa melhorar a condição dos usuários que trafegam diariamente. Proporcionar estes benefícios reduzindo os custos de construção e manutenção é uma busca constante no setor de engenharia.

A análise realizada nesta monografia apresentou, notadamente, a diferença na resistência, visibilidade e manutenção do ponto de vista técnico mais viável do pavimento rígido comparado com o flexível reafirmando a conclusão em vantagens na escolha pelo projeto em estrutura de concreto.

Com base no levantamento bibliográfico, nas comparações feitas entre os dois pavimentos, considerando as características presentes nesta obra o custo ao longo de um projeto de vida útil para 20 anos, nos leva a concluir que o pavimento flexível apresenta uma menor atratividade considerando somente aspectos construtivos e citados na presente obra, mesmo apresentando vantagens, não é comum encontrarmos projetos em pavimentos rígidos nas vias brasileiras diferentemente do que acontece em outros países, onde o mesmo é bem difundido e observamos com mais frequência.

BIBLIOGRAFIA

BALBO, José Tadeu. Pavimentos de Concreto. São Paulo. Oficina de Textos. 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani Bernucci, et al. Pavimentação Asfáltica. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ABEDA, 2007.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes/IPR. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2007.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes/IPR. Manual de Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes/IPR. Manual de Pavimentos Rígidos. Rio de Janeiro, 2004.

SENÇO, Wlastermiller de. Manual Prático de Pavimentação. São Paulo: PINI, 2007.

PITTA, Márcio Rocha. Dimensionamento de PVIMENTOS Rodoviários de Concreto. 10.ed. São Paulo, ABCP, 1998.